

Entwicklung einer optischen Messmethode zur Analyse lateraler Mikrostrukturoberflächen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Ilmenau

vorgelegt von

M.Sc. Balazs Horvath
geboren am 01.07.1976
in Budapest / Ungarn

Vorsitzender :

Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Weiß, TU Ilmenau

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Wurmus, TU Ilmenau
2. Prof. Dr. rer. nat. habil. Stefan Sinzinger, TU Ilmenau
3. Prof. Dr. rer. nat. habil. Karl Hehl, Innovent e.V. Jena

Tag der Einreichung: 20. Juni 2006

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 2. März 2007

Kurzfassung

Obwohl zahlreiche Verfahren für 3D-Oberflächenmessung in der Mikrotechnik zur Verfügung stehen, ist die Analyse von stark geneigten seitlichen Oberflächen noch ungelöst. Dies stellt vor allem bei Mikroreplikationstechniken eine Erschwernis dar, da die Qualität der lateralen Gleitzonen hinsichtlich des Herstellungsprozesses eine entscheidende Rolle spielt.

Die vorliegende Arbeit stellt ein neuartiges optisches Messverfahren vor, das für die Rauheitsanalyse von vertikalen Mikrostrukturbereichen geeignet ist. Die senkrechten Oberflächen werden mit einem konvergenten Laserstrahl beleuchtet und die reflektierten objektiven Specklestrukturen über dem Einfallsstrahl in einem möglichst breiten Raumteil erfasst. Da die Ortsfrequenz eines objektiven Specklemusters im umgekehrten Verhältnis zum Durchmesser des jeweiligen Einfallsstrahls steht, können das primäre Messsignal und die sekundären Störreflexionen mit Hilfe eines angepassten räumlichen Bandpass-Filters getrennt werden. Die Rauheitsparameter der Strukturwände lassen sich aus den aufgestellten Speckle-Kontrast, Kreuz- und Auto-Korrelationsmodellen ableiten. Die experimentell ermittelten Kennlinien der Speckle-Kontrast Methode verfolgen die theoretische Beziehung und ihre Anwendungsbereiche lassen sich bis zu $R_q=0.2..0.25\text{ }\mu\text{m}$ erweitern. Neben den konventionellen angularen- und spektralen Kreuz-Korrelationstechniken wird ein neuartiges Ortskorrelationsverfahren vorgeschlagen, wobei der optische Rauheitsparameter durch geringfügige Verschiebung der Probe errechnet wird. Es wird nachgewiesen, dass die verwendeten Winkeldifferenzen oder Probenverschiebungen einen Einfluss auf die Kennliniengradienten ausüben. Dadurch können der Messbereich und die Genauigkeit der Vermessung verändert werden und der Messprozess lässt sich zu vordefinierten Bedingungen anpassen. Die vertikalen Oberflächen von Mikroabformwerkzeugen oder Mikrostrukturen sind durch die aufgestellten Messmodelle in einem Bereich von $R_q=0..0,5\text{ }\mu\text{m}$ mit einer Genauigkeit von $r=\pm 8-10\text{ nm}$ zu analysieren.

Zur Untersuchung der Messunsicherheit wird eine wahrscheinlichkeitstheoretische Methode abgeleitet, wobei zur Berechnung der Konfidenzradialen sowohl die systematischen als auch die zufälligen Fehler berücksichtigt werden.

Auf Basis der Kirchhoffschen Beugungstheorie wird ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem die Funktionen von Speckle-Vermessungen für beliebige Beleuchtungen, Materialeigenschaften und geometrischen Anordnungen modelliert werden können. Dadurch besteht die Möglichkeit, praktisch nicht erfassbare Effekte und die technische Realisierbarkeit jeglicher Speckle-Auswertung zu untersuchen.

Summary

Although there are several mechanical and optical profilometer methods for 3D measurement of microstructures available, the roughness analysis of inclined structure areas, inner surfaces is not yet solved. It forms a difficulty especially for the replication techniques used in microtechnology (hot embossing, injection embossing etc.), since the quality of edges and lateral surfaces of form tools and insets is of critical importance in respect of the final product.

This study describes an optical, coherent, parametrical technique for non-contact inspection of sidewalls of microstructures. The method is based on coherent scattering and evaluation of objective speckle patterns. The vertical areas are illuminated by a convergent laser beam at an adequate incident angle and the reflected characteristic intensity structures are detected directly over the incident beam in a space range as wide as possible. It is typical of the speckle phenomenon that its characteristic spatial frequency is inversely related to the diameter of the incident beam. Thus, the primary reflection (measurement signal) and the secondary scattered disturbance are to be separated by means of a matched spatial band-pass filter. Roughness parameters of vertical areas can be derived from the speckle-contrast, cross and auto-correlation models set up.

Experimentally determined characteristic curves of the speckle-contrast measurements follow the theoretical relation and its practical use can be extended up to an RMS roughness of 0.2-0.25 μm . In addition to the well-established cross-correlation methods, a new spatial correlation evaluation is proposed, in which the correlation-coefficient is calculated by a minor shift of the probe. It is demonstrated that the incident angle variation or the probe shift used, exert influence upon the gradient of characteristic curves. Thus, the application range and the precision of the measurement model can be varied and the process can be adjusted to certain requirements. By means of the measurement models set up, vertical surfaces of micro-form tools or microstructures can be analysed in the range of $\text{RMS}=0..0.5 \mu\text{m}$ with a precision of 8-10 nm.

For analysis of the reliability, a likelihood-method is derived which allows for both systematic and statistical errors in order to calculate the confidence intervals.

In the last part of the study, a simulation software is developed on the basis of Kirchhoff's diffraction theory, by which the functions of speckle measurement methods can be modeled for optional illuminations, material properties and geometrical arrangements. Thus, a computative possibility is made available for the examination of technical feasibility of any speckle evaluations.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Mikrosystemtechnik der Technischen Universität Ilmenau und im Institut Innovent Technologieentwicklung e.V. in Jena.

Herzlich möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Wurmus, Leiter des Fachgebiets Mikrosystemtechnik bedanken, der diese Arbeit ermöglichte und förderte und durch seine stete Diskussionsbereitschaft zu wichtigen Anregungen beitrug.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Albrecht Hertzsch, von dem ich zu den wichtigsten theoretischen und praktischen Fragen jeweils konstruktive Hinweise bekommen habe. Seine wertvollen Anregungen in der schwierigen Anfangsphase haben zum erfolgreichen Abschluss der Arbeit beigetragen. Für die klaren und deutlichen theoretischen Erklärungen bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Karl Hehl, Leiter der Arbeitsgruppe Technische Optik bei Innovent e.V.

Ebenso möchte ich mich bei allen Arbeitskollegen des Fachgebiets bedanken, die mir bei den Laborarbeiten, bei Herstellung von Testwafern und beim Aufbau des Messgerätes Unterstützung gaben.

Mein persönlicher Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Klara Wenzel, Dr.-Ing. Antal Huba und Dipl.-Ing. Bela Gordos.

Teile dieser Arbeit wurden gefördert durch TMWFK (Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst) im Rahmen des Verbundprojektes „Strukturierung von Mikroformeinsätzen für Replikationsverfahren“.

Inhalt

| | |
|---|-----------|
| Symbolverzeichnis | 1 |
| 1. Einführung | 3 |
| 2. Mikrotechnische Oberflächenmessverfahren und Auswahl der Messmethode .. | 6 |
| 2.1. Oberflächenmessverfahren in der Mikrotechnik | 6 |
| 2.2. Zielorientierte Auswahl der Messmethode | 10 |
| 3. Theoretische Beschreibung von Specklemustern | 15 |
| 3.1. Entstehung der Speckles, objektive und subjektive Strukturen | 15 |
| 3.2. Auswertemöglichkeiten, Speckle-Kontrast, Speckle-Korrelation | 18 |
| 3.3. Auto-Korrelation der Specklemuster und die mittlere Specklegröße | 22 |
| 4. Entwicklung eines Messsystems zur Analyse vertikaler Mikrostrukturbereiche | 24 |
| 4.1. Theoretische Grundlagen und das Aufbaukonzept | 24 |
| 4.2. Konstruktion des Messsystems | 30 |
| 4.3. Optimierung des Filterprozesses | 34 |
| 4.4. Software-Applikation für die Steuerung und Auswertung | 39 |
| 5. Experimente und ihre Auswertung | 43 |
| 5.1. Erzeugung einer Referenzreihe zur Kalibrierung | 43 |
| 5.2. Statistische Verfahren | 45 |
| 5.3. Kreuz-Korrelationen | 49 |
| 5.3.1. Angulare Kreuz-Korrelation (ASK) | 51 |
| 5.3.2. Örtliche Kreuz-Korrelation (OSK) | 53 |
| 5.4. Auto-Korrelation (AKF) | 55 |
| 6. Analyse der Messunsicherheit | 57 |
| 6.1. Interpretation der Messgenauigkeit für parametrische Vermessungen | 57 |
| 6.2. Wahrscheinlichkeitstheoretische Untersuchung der Resultate | 61 |
| 7. Numerische Simulation des Verfahrens mit Hilfe der skalaren Beugungstheorie | 65 |
| 7.1. Grundlagen aus der skalaren Beugungstheorie | 65 |
| 7.2. Generierung fiktiver Oberflächenprofile als diskrete mathematischen Funktionen | 68 |
| 7.3. Rechnerische Realisierung des Algorithmus | 70 |
| 7.4. Die Simulationssoftware. Übereinstimmung mit den traditionellen Beugungsformeln | 75 |
| 7.5. Simulationsergebnisse für die störungsfreie Reflexion | 78 |

| | |
|--|-----------|
| 7.5.1. Speckle-Kontrast | 80 |
| 7.5.2. Kreuz-Korrelationen | 82 |
| 7.5.3. Auto-Korrelation | 85 |
| 7.6. Modellierung der Mehrfachstreuung | 86 |
| 7.7. Simulationsergebnisse für die Mehrfachstreuung | 92 |
| 7.8. Vergleich der experimentellen und rechnerischen Resultate | 94 |
| 8. Zusammenfassung | 96 |
| A. Anhänge | |
| A.1. Diagramme von gemessenen statistischen Kenngrößen | 100 |
| A.2. Technische Daten des Messsystems | 102 |
| A.3. Literatur | 103 |
| A.4. Thesen | 107 |
| A.5. Erklärung | 108 |

Symbolverzeichnis

| | |
|------------------------|---|
| $a(\bar{x})$ | komplexe Amplitude in der Objektebene |
| $A(\bar{\mathbf{x}})$ | komplexe Amplitude in der Beobachtungsebene |
| AKF(x) | normierte Auto-Korrelationsfunktion |
| α | Neigungswinkel der Strukturwand |
| β | Konstante |
| d, D | Durchmesser |
| Δ_a, Δ_q | arithmetischer/quadratischer Mittelwert der Profilneigungen |
| $\Delta\phi$ | Einfallswinkeländerung (bei angularer Korrelation) |
| $\Delta\lambda$ | Wellenlängenänderung (bei spektraler Korrelation) |
| Δx | Probenverschiebung (bei örtlicher Korrelation) |
| e | Basis des natürlichen Logarithmus |
| f | Brennweite |
| Δf | Defokussierung |
| ϕ | Einfalls- und Streuwinkel bei einfachen Anordnungen |
| $\Phi(x)$ | Phase zur Koordinate x |
| H(x), h(x) | Höhenfunktion des Oberflächenprofils |
| \hat{i} | imaginäre Einheit |
| I | Intensität |
| $I(\bar{\mathbf{x}})$ | Intensität in der Beobachtungsebene |
| I(i,j) | Intensitätsverteilung in der Aufnahme |
| k | Wellenzahl, $k=2\pi/\lambda$ |
| K | Speckle-Kontrast |
| κ | Rayleigh-Koeffizient |
| L | Länge |
| λ | Wellenlänge des Lichtes |
| λ_a, λ_q | mittlere arithmetische/quadratische Wellenlänge des Oberflächenprofils |
| Λ_k | Korrelationslänge des Oberflächenprofils |
| N(x) | Neigungsfaktor zur Koordinate x |
| NA | Numerische Apertur |
| v | Ortsfrequenz |
| ω | Kippwinkel der planparallelen Glasplatte |
| P(..) | Wahrscheinlichkeit des Ereignisses '..' |
| $\pm r$ | Konfidenzintervall |
| R _{..} | Rauigkeitsparameter: R _a , R _q , R _{max} , etc.. |
| ρ_{12} | Kreuz-Korrelationskoeffizient |
| ρ_{11} | Auto-Korrelationskoeffizient |
| ρ_R | Reflexionsvermögen |
| σ, s | Standardabweichung i.a. |
| u, u' | Objekt- und Bildhöhen |

| | |
|---|--|
| Ψ | Strahlkonvergenz |
| x,y | Koordinaten der Objektebene |
| ξ,η | Koordinaten der Beobachtungsebene |
| $\bar{x}(x,y)$ | Ortsvektor in der Objektebene |
| $\bar{\mathbf{x}}(\mathbf{x},\mathbf{h})$ | Ortsvektor in der Beobachtungsebene |
| i,j | Bildkoordinaten |
| t | Schirmkoordinate (bei eindimensionaler Simulation) |
| \bar{n} | Normalenvektor |
| \bar{p} | Streuvektor |
| \bar{q} | Einfallsvektor |
| \bar{r} | Reflexionsvektor |
| Θ_e | lokaler Einfallswinkel |
| Θ_s | lokaler Streuwinkel |
| Θ_n | Richtungswinkel des Normalenvektors (in einem vordefinierten Koordinatensystem) |
| Θ_p | Richtungswinkel des Streuvektors |
| Θ_q | Richtungswinkel des Einfallvektors |
| Θ_r | Richtungswinkel des Reflexionsvektors |
| $ $ | Absolutwert, Vektorlänge |
| $\langle \rangle$ | Mittelwert in einer Ebene, z.B. $\langle I(i,j) \rangle$ = Mittelintensität eines Verteilungsbildes $I(i,j)$ |
| $\bar{}$ | zeitlicher oder örtlicher Mittelwert, (\bar{I} = Durchschnitt der Werte $I_1, I_2 \dots I_N$) |
| \dots^* | konjugiert komplex |
| $\mathfrak{F}\{..\}$ | Fourier-Transformierte |
| ASK | angulare Speckle-Korrelation |
| SSK | spektrale Speckle-Korrelation |
| OSK | örtliche Speckle-Korrelation |

Kapitel 1.

Einführung

Die hohe Qualität und die gleichzeitig niedrigen Herstellungskosten spielen eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Konkurrenzfähigkeit von mikrotechnologischen Herstellungsprozessen. Die Miniaturisierung sowie die ständig sich entwickelnden mikrotechnischen Fertigungsverfahren erfordern eine vollautomatisierte und prozessintegrierte Qualitätsprüfung, die zugleich eine permanente Rückkopplung für die Optimierung der technologischen Parameter bildet.

Die Formabweichungen der Fertigbauteile beeinflussen die Funktionsfähigkeit, die Oberflächenrauigkeit und -welligkeit bestimmen durch das Laufverhalten und die Gleiteigenschaften der Oberflächen die Lebensdauer eines Bauteils. Durch den Miniaturisierungstrend liegt die Tiefe des Rauigkeitsprofils oft in derselben Größenordnung wie die Strukturabmessung selbst. Damit beschreibt die Oberflächenrauigkeit wesentlich die Qualität derartiger Elemente.

In der mikrotechnischen Fertigungstechnologie steht derzeit die wirtschaftliche Mikroreplikationstechnik im Vordergrund. Die traditionellen Mikrostrukturierungsverfahren sind seit langer Zeit bekannt und wurden bisher fast ausschließlich an Silizium und Glas als Strukturierungsmaterial verwendet. Es sind aber in vielen Bereichen preiswertere, einfach verformbare Ausgangsmaterialien einzusetzen, vor allem verschiedene Polymere stehen im Mittelpunkt derzeitiger Entwicklungen. Dabei bieten sich das Heißprägen, Spritzprägen und Spritzgießen für zahlreiche Thermoplast-Klassen (PMMA, PP, PC, usw.) als günstigere Alternativen an. Die wichtigsten Mikroabformverfahren für Kunststoffe und ihre spezifischen Anwendungen sind in der Tabelle 1.1 zusammengefasst.

Zur Abformung von Keramiken oder Metallen können vorwiegend die gleichen Verfahren verwendet werden wie bei Kunststoffen. Ausgangsmaterialien sind hier meist keramische oder metallische Pulver, die in einem Bindersystem für die Abformung aufbereitet und anschließend als s.g. Grünteile durch Sintern in die fertigen Bauteile umgewandelt werden.

Die wirtschaftliche Erzeugung derartiger Mikrostrukturen verlangt die Anwendung großflächiger Werkzeuge. Strukturen von einigen μm sind auf der Oberfläche des Formeinsatzes von mehreren cm^2 angeordnet, während die geometrischen Toleranzen im nm-Bereich liegen. Es müssen somit extrem hohe Anforderungen an die Prägewerkzeuge gestellt werden, was auch völlig neue, bisher nicht angewendete Untersuchungsmethoden bedingt.

| Verfahren | Material | Anwendung | Beispiele |
|---|---|--|---|
| Spritzgießen | <ul style="list-style-type: none"> • Thermoplast • Duroplast • Thermoplastischer Elastomer | Mittlere bis große Serien von 3D-Mikroteilen und mikrostrukturierten Substraten | <ul style="list-style-type: none"> • Elektrische und optische Steckverbinder • Zahnräder, Getriebe • Medizinische Bauteile, Pumpen, Biochips |
| Heißprägen | <ul style="list-style-type: none"> • Amorpher Thermoplast | Prototyping und Kleinserien von 2½D-mikrostrukturierten Bauteilen | <ul style="list-style-type: none"> • Optische Wellenleiter • Gitter, Hologramme • Biochips |
| Spritzprägen | <ul style="list-style-type: none"> • Thermoplast | Mittlere bis große Serien von 2½D-Mikroteilen und mikrostrukturierten Substraten | <ul style="list-style-type: none"> • Mikrooptische Komponenten • Zahnräder, Getriebe • Medizinische Bauteile, Biochips |
| Reaktionsgießen Vakuumgießen | <ul style="list-style-type: none"> • Silikon • Polyurethanharz • Epoxidharz | Funktionsmuster und Prototypen | <ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Bauteile • Gehäuse • Biochips |

Tabelle 1.1 Zusammenfassung von Mikroabformverfahren

Vom geometrischem Standpunkt aus sind kritische Stellen die Kanten, Seitenwände und lateralen Strukturen eines Formeinsatzes. Da diese Bereiche während des Abformens als Gleitzonen wirken, haben diese hochgradigen Einfluss auf das Haftungsverhalten zwischen Formeinsätzen und Formteilen. Falls die lateralen Oberflächen der Prägestrukturen zu rauh sind oder vorspringen, kann es beim Ausheben des Einsatzes zu Beschädigungen am Werkstück kommen.

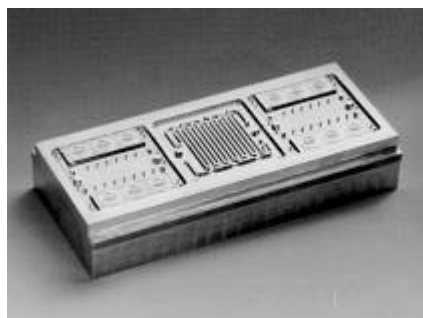


Abbildung 1.1 Mikroformeinsatz und ein fertiger Formteil

Um solche Fehler zu vermeiden, besteht bei den Replikationswerkzeug-Herstellern ein hohes Interesse an der Entwicklung von Messverfahren zur Inspektion vertikaler Strukturbereiche. Einige Versuche wurden realisiert, um diese Messproblematik zu lösen. Ein modifiziertes Profilometer oder die im Kontakt-Modus verwendeten AFM-Aufbauten [41] gewährleisten aber keine Berührungslosigkeit, ihre Einstellung ist kompliziert, die Vermessung ist langsam und die ungünstigen Abtastbedingungen führen oft zum Abbrechen der Abtastspitze.

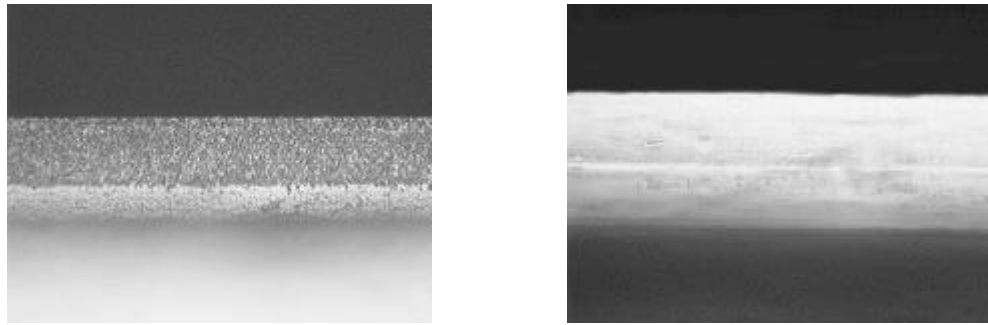


Abbildung 1.2 Seitenwandbereiche von Replikationswerkzeugen mit unterschiedlichen Rauigkeiten

Die vorliegende Arbeit will auf diesem Gebiet ein optisches Messverfahren einführen, das für die quantitative Analyse der steilen, bisher "unsichtbaren" Werkzeugoberflächen geeignet ist. Das Grundprinzip des Messverfahrens beruht auf der monochromatischen Laser Speckle-Erscheinung. Die messtechnische Anwendung dieser Methode ist nicht neu, seit Anfang der achtziger Jahre wurde der Einsatz von Speckleverfahren in der Oberflächenanalyse weltweit getestet [3,18,29]. Obwohl die Speckle-Kontrast-, angularen (ASK) und spektralen (SSK) Speckle-Korrelation Methoden bereits als traditionell zu nennen sind, wurden sie bisher nur beschränkt und für spezielle Aufgaben angewendet. Die Gründe dafür sind vor allem im begrenzter Messbereich und in der Materialabhängigkeit zu suchen, die allerdings bei jedem Streulichtmessverfahren auftreten. Leider blieben oft auch die Beziehungen zwischen der Objekt- und Speckle-Statistik unklar.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein optisches, parametrisches Verfahren vorzustellen, das ausdrücklich für die Inspektion seitlicher Bereiche von Mikroreplikationswerkzeugen geeignet ist und auf der kohärenten Lichtstreuung basiert. Mehrere Eigenschaften der Speckle-Erscheinung werden ausgenutzt, um die Speckleverteilungen im Ortsfrequenzbereich zu filtern und mittels verschiedener statistischer Korrelationsmethoden auszuwerten. Darüber hinaus wird eine neuartige Korrelationstechnik eingeführt.

Das zweite Kapitel enthält eine kurze Zusammenfassung der gegenwärtig angewendeten optischen Methoden sowie die zielorientierte Auswahl des realisierten Speckleverfahrens mit Diskussion der Ausführungsvarianten. Der dritte Abschnitt diskutiert die theoretischen Grundlagen des Prinzips. Das vierte Kapitel stellt den eigentlichen Messaufbau, die Optimierung des Filterprozesses, die experimentelle Ergebnisse sowie ihre wahrscheinlichkeitstheoretische Auswertung dar. Für die Überprüfung der praktischen Resultate wurde ein Simulationsmodell ausgearbeitet, das die wesentlichen experimentellen Randbedingungen der konkreten Anwendung berücksichtigt. Die Beschreibung des Algorithmus, die rechnerischen Ergebnisse und ihr Vergleich mit experimentellen Resultaten werden in dem letzten Kapitel vorgestellt.

Es ist das Ziel dieser Arbeit, am konkreten Beispiel „Rauigkeitsanalyse der Seitenwände von Replikationswerkzeugen“ die Vorzüge der Specklemethoden zu diskutieren und dem Anwender einen theoretischen und experimentellen Zugang zum Verfahren zu ermöglichen.

Kapitel 2.

Mikrotechnische Oberflächenmessverfahren und Auswahl der Messmethode

Entsprechend der Zielsetzung aus dem ersten Kapitel konzentriere ich mich auf die optischen Oberflächenmessverfahren. Ihre Anwendungsbereiche und technischen Parameter werden zusammengefasst. Aus den Eigenschaften der zu analysierenden Strukturen werden verschiedene Lösungsvarianten abgeleitet und deren Realisierbarkeit wird diskutiert. Unter Beachtung der Vor- und Nachteile wird das zu realisierende Verfahren ausgewählt.

2.1. Oberflächenmessverfahren in der Mikrotechnik

Abbildung 2.1 stellt eine systematische Zusammenfassung der in Mikrotechnik gebräuchlichen Oberflächenmessmethoden dar. Die einsetzbaren Verfahren können sowohl in ihren Grundprinzipien als auch in den Auswertelgorithmen unterschiedlich sein.

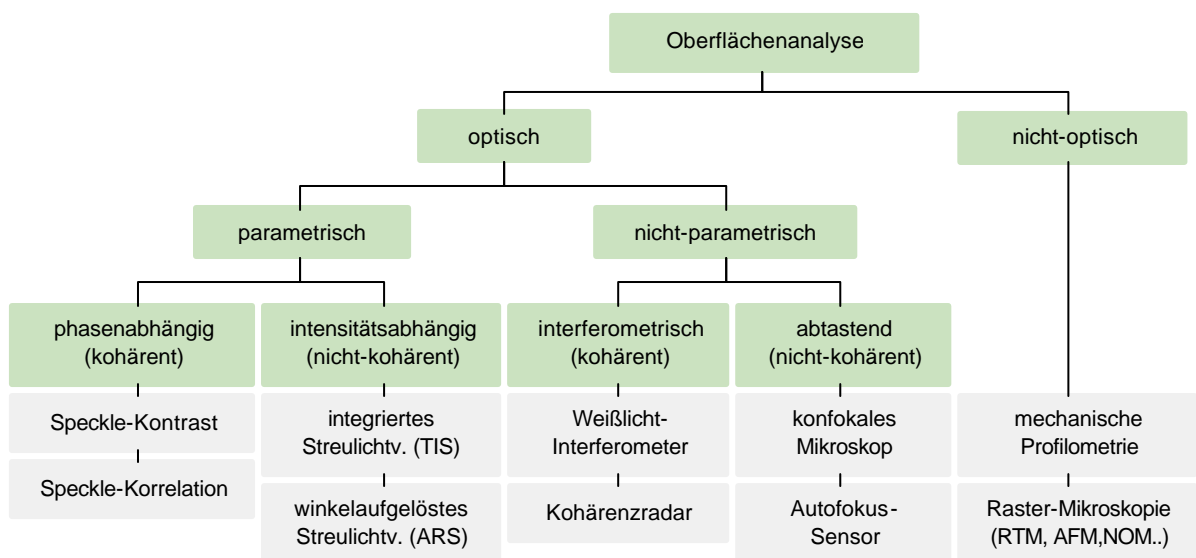


Abbildung 2.1 Klassifizierung von Oberflächenmessverfahren in der Mikrotechnik

Standardmethoden zur Vermessung der Oberflächentopographie sind die mechanischen Abtastsensoren oder Tastschnittgeräte, wobei die Rauigkeits- und Welligkeitsparameter aus den punktwise aufgenommenen Oberflächendaten berechnet werden.

Dieselbe nicht-optische Klasse repräsentieren die in den achtziger Jahren entwickelten Rastersonde-Methoden: das Atomkraftmikroskop, das Rastertunnelmikroskop und das optische Nahfeldmikroskop. Die Rastersondenmethoden besitzen eine vertikale Auflösung unter 1 nm (für AFM typischerweise 0.2 nm), aber sowohl der vertikale (Z) als auch der horizontale (XY) Messbereich ist wegen der piezoelektrischen Bewegung stark eingeschränkt. Der maximale Oberflächenhöhen-Unterschied beträgt einige Mikrometer, die gleichzeitig einscannbare Fläche liegt bei höchstens 100x100 µm (typische Bereiche sind 20x20x2 µm; 40x40x4 µm; 80x80x8 µm). Diese Geräte spielen daher ausschließlich in Laboranwendungen eine Rolle, und können für die Kalibrierung anderer Messmethoden als Referenz dienen, sind aber als praxisnahe Qualitätsprüfverfahren nicht einsetzbar.

Bei den optischen Methoden kann bezogen auf die der Funktion zwischen zwei Hauptklassen unterschieden werden: a) Methoden, die das Oberflächenprofil punktwise erfassen und abbilden (nicht-parametrisch) und b) Methoden, die Oberflächenmerkmale integral erfassen und durch statistische Parameter beschreiben (parametrisch).

Die Ersteren beruhen auf einer ähnlichen Funktionsweise wie die mechanischen Profilometer mit dem Unterschied, dass die Erfassung der Profilpunkte auf ein optisches Prinzip zurückzuführen ist. Die Rauigkeitskennwerte können aus den topographischen Informationen berechnet werden. Die Definitionen wichtigerer Rauigkeitsparameter sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

| Art | Bezeichnung | Kz. | Definition |
|---|---|-------------|--|
| vertikale Rauheitskenngrößen | arithmetischer Mittenrauhwert | R_a | $R_a = \frac{1}{L} \int_L \langle h \rangle - h(x) dx$ |
| | quadratischer Mittenrauhwert | R_q | $R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_L (\langle h \rangle - h(x))^2 dx}$ |
| Profilneigungen | arithmetischer Mittelwert der Profilneigungen | Δ_a | $\Delta_a = \frac{1}{L} \int_L \left \frac{dh(x)}{dx} \right dx$ |
| | quadratischer Mittelwert der Profilneigungen | Δ_q | $\Delta_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_L \left(\frac{dh(x)}{dx} \right)^2 dx}$ |
| horizontale Rauheitskenngrößen | mittlere arithmetische Wellenlänge | λ_a | $I_a = \frac{2pR_a}{\Delta_a}$ |
| | mittlere quadratische Wellenlänge | λ_q | $I_q = \frac{2pR_q}{\Delta_q}$ |
| | Korrelationslänge | Λ_k | $\Lambda_k = \Delta x \text{ zu } 1/e\text{-Abfall der AKF}(h(x)) \approx \frac{I_q}{p\sqrt{2}}$ |

Tabelle 2.1 Definitionen wichtigerer Rauigkeitsparameter

Parametrische Methoden dagegen ermitteln einen Parameter direkt aus den Eigenschaften des von der Oberfläche reflektierten Lichtes, der durch ein mathematisches Modell mit einer Rauigkeitskenngrößen verknüpft wird. Diese Messprinzipien zeichnen sich vor allem durch die kurze Messzeiten, die flexible Einsetzbarkeit, die echtzeitfähige Vermessung und in vielen Fällen durch eine preiswertere Konstruktion aus. Wegen der Berührungslosigkeit können sie auch in den produktionsnahen Anwendungen vorzugsweise eingesetzt werden, da sie in den meisten Fällen in den Herstellungsprozess integrierbar sind. Ihre Kalibrierungen sind zielorientiert durchzuführen und der jeweiligen Aufgabe anzupassen. Sie werden oftmals als eine Komparatormessung benutzt, wobei der relative Wert einer Oberflächeneigenschaft zu einem Grenzwert abgefragt wird (dies ist bei Herstellungsprozessen vorteilhaft, z.B. Werkzeugwechsel wegen Verschleiß). Optische Oberflächenanalyse-Verfahren werden in Tabelle 2.2 systematisch zusammengestellt.

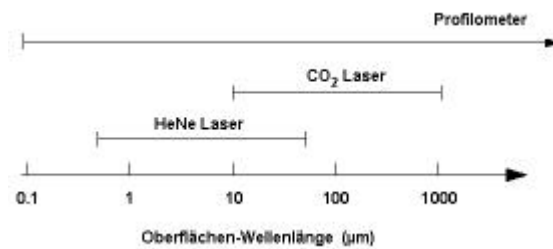


Abbildung 2.2 Bandbreiten von Streulichtverfahren für unterschiedliche Lichtquellen

Während die direkt abbildenden Systeme sich für Bewertung beliebiger Profile eignen, sind die parametrischen Verfahren meist stark bandbegrenzt (siehe Abbildung 2.2). Trotz dieser Nachteile bieten die parametrischen Methoden die Möglichkeit der

- echtzeitfähigen
- berührungslosen und damit zerstörungsfreien
- in vielen Fällen kostengünstigen
- flexibel einsetzbaren
- zur Messaufgabe anpassbaren

Vermessung von Oberflächenparametern sowohl in der Mikrotechnik als auch im allgemeinen Maschinenbau an. Immerhin wird ihre Einführung in die industrielle Messtechnik durch fehlende Normalisierungen und durch einen unzureichenden Entwicklungsstand der Messgeräte behindert. Die einzige derartige Normung wurde für das integrierte Streulichtverfahren in der USA ausgearbeitet, wobei der Parameter TIS als eine charakteristische Messgröße für die Oberflächenqualität akzeptiert ist (Norm ISO54487 [8]).

| Methode | Vertikaler Messbereich | Vertikale Auflösung | Horizontaler Messbereich | Messzeit | Bandbreite | Vibrationsgrenze | ver./ hor. Param. ? | Gerät vorh. ? |
|--|----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|---------------|
| <i>profilometrische Methoden</i> | | | | | | | | |
| Autofokus | 1000 µm (Linsnbewegung) | 15 nm | 100 mm | 0.1 s/mm | 1 - .. µm (Spotdurchm.) | 500 nm | V H | Ja |
| Konfokales Mikroskop | 5000 µm (Z-Bewegung) | 50 nm | 300x300 µm (Gesichtsfeld) | 0.1 s/mm | 1 - .. µm (Spotdurchm.) | 500 nm | V H | Ja |
| Interferometer | <~ 3 µm | ~ 1 nm | 300x300 µm (Gesichtsfeld) | 2 s/0.1 m ² | 0.5 - .. µm (Detektorgroße) | 1 nm (= vertikale Auflösung) | V H | Ja |
| Kohärenzradar | 5000 µm (Z-Bewegung) | 1 µ | 10x10 mm (Gesichtsfeld) | 5 s/100 m ² | 1 - .. µm (Detektorgroße) | 500 nm | V (H) (H – wenn R _q < 0.1 µm) | Ja |
| <i>parametrische Methoden</i> | | | | | | | | |
| Integriertes Streulichtverfahren (TIS) | R _q < 150 nm | ~ 2 nm | - | 100 ms /M. (Aufnahmezeit) | .. - 100 µm | - | V | Ja |
| Winkelaufgelöstes Streulichtverfahren (ARS) | R _q < 150 nm | ~ 5 nm | - | 1 s /M. (Aufnahme + Berechnung) | .. - 100 µm | 0.01·D | V H | Ja |
| Speckle-Kontrast | R _q < 150 nm | ~ 2 nm | - | 100 ms /M. (Aufnahmezeit) | .. - 100 µm | - | V | Nein |
| Speckle-Korrelation | R _q < 2 µm | ~ 10 - 15 nm (rauigkeitsabhängig) | - | 1 s /M. (Aufnahme + Berechnung) | .. - 100 µm | 0.01·D | V (H?) | Nein |

Tabelle 2.2 Technische Parameter der optischen Oberflächenmessverfahren

2.2. Zielorientierte Auswahl der Messmethode

Die profilometrischen und parametrischen Oberflächenmessverfahren sind zwar in der Mikrotechnik weitgehend verbreitet, sie sind jedoch für die quantitative Analyse von stark geneigten oder vertikalen Strukturoberflächen nicht einzusetzen. Die mechanischen Tastgeräte können aufgrund des großen Kegelwinkels ihrer Abtastspitze Profilneigungen bis maximal 20° flächentreu erfassen. Die Rastersonden-Geräte sind wegen ihres schmalen vertikalen Messbereichs schon bei 3-5° Neigungswinkel nicht mehr effektiv benutzbar. Bei den Interferometern ist der lotrechte Einfall des Messlichtbündels eine Voraussetzung. Die optischen Profilometer (Autofokus, konfokaler Sensor) können infolge des niedrigen Reflexionsvermögens von stark geneigten Oberflächenelementen die mittlere Punktposition nicht ermitteln (der Grenzwinkel von Oberflächenneigungen für das konfokale Mikroskop liegt bei 25°).

Die für Mikroreplikationstechnik verwendeten Formeinsätze sind konventionell mittels LIGA Verfahrens erzeugt. Dabei können wegen der hohen Intensität und Parallelität der Synchrotronstrahlung Polymer-Erstmuster mit nahezu senkrechten Seitenwänden und hohem Aspektverhältnis (bis zu 100) strukturiert werden.



Abbildung 2.3 LIGA-Replikationswerkzeug und sein lateraler Flächenbereich

Die Materialien der LIGA Werkzeuge sind Metalle: Nickel, Kupfer und Gold. Der typische Rauheitsbereich liegt bei $R_a=10-40$ nm.

Preiswertere Alternativen der LIGA-Technik sind die Mikrozerspanungsmethoden (Mikrofräsen, Mikrobohren). Sie können für jedes Material eingesetzt werden, in der Praxis wird aber meistens Messing (CuZn39Pb3) oder CrMo-Werkzeugstahl (42CrMo4) benutzt. Die handelsüblichen Naturdiamant-Schaftfräser besitzen einen minimalen Durchmesser von 300 µm, der gleichzeitig die minimal gestaltbare Grabenbreite bedeutet.

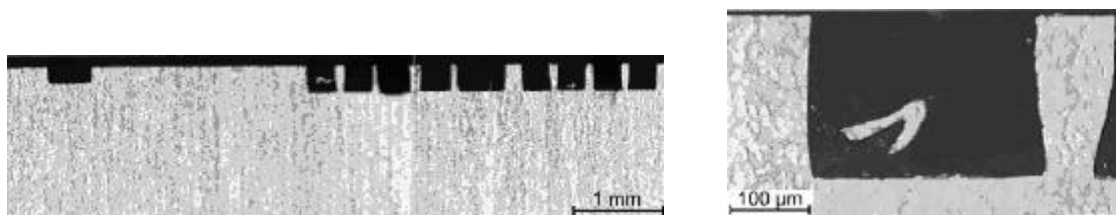


Abbildung 2.4 Profilschnitt einer mikrogefrästen Werkzeugstruktur

Bei mikrozerspannten Werkzeugen entstehen Profildeformationen und Formabweichungen (Abbildung 2.4). Die erreichbare Oberflächenrauigkeit liegt bei ca. $R_a=200-400$ nm.

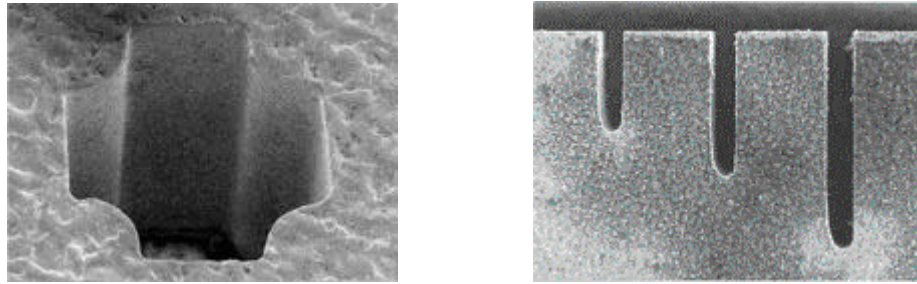


Abbildung 2.5 Werkzeugstruktur mit Mikrosenkerodieren

Die mit Mikrosenkerodieren und Feindrahterosieren hergestellten Strukturen sind begrenzt auf 50 μm minimalen Breite und auf 1-2 mm maximale Profiltiefe. Die Formabweichung liegt bei $\pm 1 \mu\text{m}$ und die typischen Rauigkeiten sind $R_a=100\text{-}200 \text{ nm}$. Die vertikalen Profilflächen sind entweder senkrecht zur Basisfläche oder haben eine maximale Neigung von 15° .

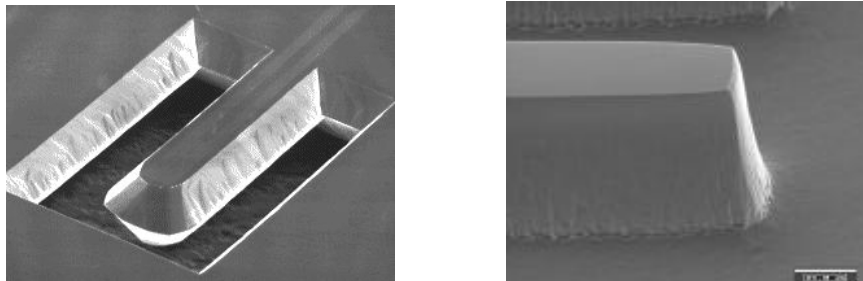


Abbildung 2.6 Geätzte Werkzeugstrukturen

Abschließend ist das Ätzverfahren als eine mögliche Alternative zu erwähnen, das in der Mikrotechnik seit langem verwendet wird. Hierbei ist das Ausgangsmaterial einkristallines Silizium und es können je nach Ätztechnologie unterschiedliche Profilformen erreicht werden (Tabelle 2.3). Aufgrund des Ätzmittels wird allgemein zwischen Nass- und Trockenätzen unterschieden.

Es sind zwei Varianten des Nassätzverfahrens bekannt: das isotrope Ätzen, das in jeder Richtung dieselben Ätzgeschwindigkeiten besitzt, und das anisotrope Ätzen, wobei die Ätzgeschwindigkeit von der Si Kristallrichtungen abhängt. Die Anisotropie, die sich aus dem einkristallinen Gitteraufbau des Siliziums ableiten lässt, führt zu unterschiedlichen Ätzraten in [111], [110] oder [100] Richtung des Kristalls. Es können sich abhängig von der Orientierung des Ausgangswafers entweder senkrechte Seitenwände bilden, oder wir erhalten Flächen, die unter einem festen Winkel von $54,7^\circ$ zur horizontalen Fläche geneigt sind.

Beim Trockenätzen wird zwischen chemischen und die physikalischen Verfahren unterschieden. Beim Ersteren wird ein Niederdruck-Glimmentladungseffekt (Plasma) benutzt, um Trägerpaare und chemisch aktive Radikale zu erzeugen. Diese reagieren mit dem Silizium und lösen Atome aus dem Kristallgitter heraus. In dieser Weise kann ein anisotropes Profil erzeugt werden (GPÄ, PCE).

Die physikalischen Verfahren basieren dagegen auf dem hochenergetischen Herausschlagen von Substratatomten mittels eines Ionenstrahls. Bei hoher Dichte des einfallenden Ionenstrahls und weitestgehend horizontalen Flächen können sich Teilchen aus dem Gasraum am Substrat ablagern. Solche Seitenwandpassivierungen wirken dem Unterätzen und dem Ausbeulen

entgegen. Eine andere Möglichkeit, anisotrope Ätzprofile zu erzeugen ist die künstliche Bildung einer ätzhemmenden Schutzschicht an den entstehenden Seitenwänden. Dieses Prinzip wird beim RIE Verfahren verwendet, das eine Kombination von chemischen und physikalischen Trockenätzen verkörpert. Dabei wird in den Reaktionsraum neben dem Ätzgas SF_4 zusätzlich CHF_3 zugeführt, das die Polymerisation und damit die Seitenwandpassivierung hervorruft.


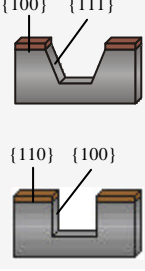

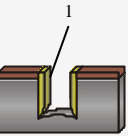
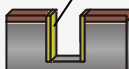
| Funktionsweise | nasschemisches Ätzen | | Trockenätzen | | | |
|---------------------|---|---|---|---|---|------------------------|
| Verfahren | isotropes Nassätzen | anisotropes Nassätzen | chemisch | | physikalisch | |
| | | | Gasphasenätzen (GPÄ) | plasmachemisches Ätzen (PCE) | Ionenätzen (IE) | Ionenstrahlätzen (IBE) |
| typisches Ätzprofil |  |  |  | ähnlich GPÄ |  1 - Redeposition von gesputtertem Material | ähnlich IE |
| Kombinationen | - | - | - | reaktives Ionenätzen (RIE) magnetfeldgeschütztes RIE (MERIE)  2 – Passivierungsschicht | reaktives Ionenstrahlätzen (RIBE) Profil ähnlich RIE oder IE | |

Tabelle 2.3 Charakteristische Profilformen von unterschiedlichen Ätzverfahren

Zusammenfassend sind die Parameter der mit Ätzverfahren erzeugten Strukturen auf Silizium-Basis anzugeben mit Struktur tiefen von 10-100 μm und mit Struktur breiten (Grabenbreite) von 10 μm bis einige Millimeter. Die Profilform kann unterschiedlich sein, die Oberflächenrauigkeit fällt in den Bereich von $R_a=50\text{-}150\text{ nm}$.

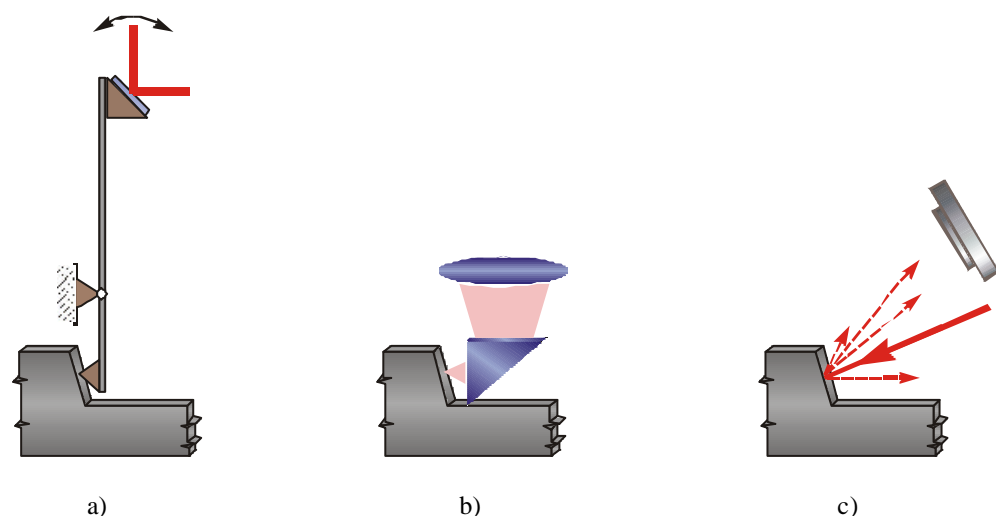


Abbildung 2.7 Ausführungsmöglichkeiten für Rauigkeitsmessung an Strukturwänden

Bei der Auswahl des entsprechenden Messprinzips müssen die im Kapitel 1. genannten Aspekte derart beachtet werden, dass möglichst viele mit einem Verfahren realisierbar sind. Grundsätzlich sind drei Modifizierungen der oben beschriebenen Verfahren möglich (Abbildung 2.7). Die erste Modifikation betrifft das mechanische Abtastprinzip und die profilfolgenden Raster-Prinzipien. Durch vertikale Anordnung von Sensorkopf und Tastbahn ist man prinzipiell in der Lage, vertikale Oberflächen zu vermessen. Mit der zweiten Modifikation lassen sich optische Profilometer umrüsten. Durch Umlenkung des Messlichtbündels und mit Hilfe eines Spiegels oder eines Prismas auf die vertikal stehende Strukturfläche kann die Abtastbahn ebenfalls in die Vertikale überführt werden. Als letzte Modifizierungsmöglichkeit bietet sich für einige Varianten der optisch-parametrischen Methoden eine optimierte Beleuchtung der lateralen Oberflächen an.

Vor allem muss festgehalten werden, dass die Untersuchung der Strukturbereiche mit relativ hohem Aspektverhältnis bei allen drei Lösungsmöglichkeiten eine Schwierigkeit bedeutet. Mikrobohrungen oder Mikrogräben mit 10-20 µm Durchmesser und mehr als 100 µm Tiefen, die mit dem LIGA Verfahren problemlos herstellbar sind, zeigen schnell die geometrischen Grenzen für eine vertikale Abtastung an.

| Anordnung | Bezeichnung | Berührungslos | Parametrisch | enge Gräben | Nebenfunktionen | Prozessintegration | schnelle Vermessung | Stabilität | technische Realisierungsprobleme |
|-----------|-------------------------|---------------|--------------|-------------|-----------------|--------------------|---------------------|------------|--|
| a | mechanisches Abtasten | | | • | • | | | ° | Abmessungen der Tastmechanismus |
| | AFM, RTM | | | • | • | | | | Empfindlichkeit, Technologie, Kosten |
| | SNOM | | | | | | | | Erfassung des Fluchtlichtes |
| b | Autofokus-Sensor | • | | | | | | | geometrische Grenzen der Lichtumlenkung (Mikroprisma, Mikrospiegel) |
| | konfokales Prinzip | • | | | | | | | |
| c | integriertes Streulicht | • | • | | | • | • | • | Erfassung des Streufeldes, Modellaufstellung |
| | winkelaufg. Streulicht | • | • | | | • | • | • | |
| | Speckle-Kontrast/Korr. | • | • | | | • | • | • | |

Tabelle 2.4 Bewertung der einzelnen Ausführungsmöglichkeiten von Abbildung 2.7

Der mechanische Taster-Hebelmechanismus zur vertikalen Abtastung der Seitenwände kann mit einem mikrotechnisch hergestellten Glasgelenk oder mit einer geätzten Cantilever-Struktur realisiert werden. Eine einfachere Möglichkeit ist es, eine handelsübliche AFM-Tastnadel zu verwenden (Abbildung 2.7/a) und mit dieser bei vertikaler Tastbahn aufgrund der kleinen Balkenbreite von wenigen Mikrometern Abmessung des AFM-Sensors auch ziemlich schmale Gräben zu untersuchen. Ein großer Nachteil dieser Variante ist es, dass mit diesem Sensor zwischen die Strukturen eingegriffen werden muss. Obwohl dieses Verfahren ein genaues und objektives Profillinien-Ergebnis zusichert, ist die Justierung schwierig, die Messzeiten sehr hoch und die Gefahr eines Abbrechens der Tastnadel groß. Bei den Rastersondenmethoden ist die Erfassung des Nahfeldes für Strukturen mit hohem Aspektverhältnis unlösbar (SNOM), weil die Empfängeroptik senkrecht hinter der Glassonde zu positionieren ist.

Bei der Messlichtbündelumlenkung von optischen Profilometern (Abbildung 2.7/b) muss der Sensorkopf ebenfalls zwischen die Strukturwände eingeführt werden, was die gleichen Nachteile bringt wie bei den mechanischen Tastgeräten. Die minimalen Abmessungen von Mikroprismen betragen ca. 0.3×0.3 mm, die Durchmesser von optischen Fasern liegen bei 0.1-0.2 mm. Somit könnten nur sehr tiefe und breite Profile untersucht werden.

Diese Schwierigkeiten lassen sich mit den parametrischen Methoden (Abbildung 2.7/c) beheben. Hierbei muss kein Sensor zwischen die Strukturen eingeführt werden wie die Annäherung an die Seitenwand auch unnötig ist. Es können aber nur solche senkrechten Flächen analysiert werden, bei denen die Beleuchtung der Wände unter einem entsprechenden Winkel realisierbar ist. Bei schmalen Gräben und bei Bohrungen mit kleinem Durchmesser können sie zwar nicht eingesetzt werden, aber für die meisten Werkzeugs Oberflächen bieten eine berührungslose, nicht umständliche, schnelle und gegen Umweltstörungen unempfindliche Methode an. Anhand Tabelle 2.4 kann festgestellt werden, dass diese Möglichkeit die meisten Anforderungen erfüllt.

Beim integrierten Streulichtverfahren ist es eine Voraussetzung, die von der Oberfläche reflektierte gesamte, diffus gestreute Lichtintensität zu detektieren. Bei steilen Strukturwänden wird das Einfallsbündel auch in Richtung des Strukturinneren oder meistens in dieser Richtung gestreut, das gesamte Streufeld kann daher nicht erfasst werden. Die physische Integrierung der diffusen Intensität mittels einer Coblenzkugel lässt sich nicht ausführen. Das winkelaufgelöste Streulichtverfahren musste nach denselben Überlegungen abgewiesen werden. Darüber hinaus würden beide Streulichtverfahren durch eine störende Lichtkomponente nachteilig beeinflusst, die durch eine zweite Reflexion an der unteren Strukturoberfläche hervorgerufen wird.

Bei Specklemethoden lässt sich die Ausfilterung der durch Mehrfachreflexion ausgelösten Streufeldkomponenten gegenüber den Streulichtverfahren durchführen. Der Grund dafür ist, dass die kohärenten Specklemuster jeweils durch eine typische Periodizität gekennzeichnet werden. Ihre Ortsfrequenz hängt von der optischen Anordnung und von der Beleuchtung ab: sie wird durch die Belichtungswellenlänge, die Konvergenz des Lichtbündels, die angeleuchtete Flächengröße und durch den Detektionsabstand (Distanz zwischen Objekt und Detektor) festgesetzt, aber nicht durch die Oberflächenrauigkeit. Die Oberflächentopographie ruft solche Nebeneffekte in den Mustern hervor, die nur mit statistischer Auswertung ermittelt werden können.

Aus den statistischen Eigenschaften der als Messsignal betrachteten Specklemuster lassen sich hernach die Rauigkeitsparameter für die Seitenwände ermitteln. Dies stellt die Grundidee und das Prinzip des realisierten Messverfahrens dar, dessen theoretische und praktische Aspekte in den nächsten Kapiteln ausführlich dargelegt werden.

Kapitel 3.

Theoretische Beschreibung von Specklemustern

Die wesentlichen theoretischen Grundlagen zu dem ausgewählten Laser-Speckle Messverfahren, die Entstehung der Speckle-Intensitätsmuster und ihre Auswertungsmöglichkeiten werden dargestellt. Theoretische Zusammenhänge zwischen den statistischen Eigenschaften der Speckleverteilungen und der Oberflächenrauigkeit werden angegeben.

3.1. Entstehung der Speckles, objektive und subjektive Strukturen

Wird eine optisch raue Oberfläche ($R_q \sim \lambda$) mit kohärentem, monochromatischem Licht beleuchtet, kann in der reflektierten Wellenfront eine typische granulierte Intensitätsstruktur, das sog. Specklemuster entdeckt werden. Streuende Objekte liefern somit eine räumliche Intensitätsstruktur, wofür ein Beispiel in der Abbildung 3.1 dargestellt ist. Es handelt sich dabei um Interferenzen von Lichtquellen, die von Objektpunkten mit statistisch verteilten Phasen ausgehen.

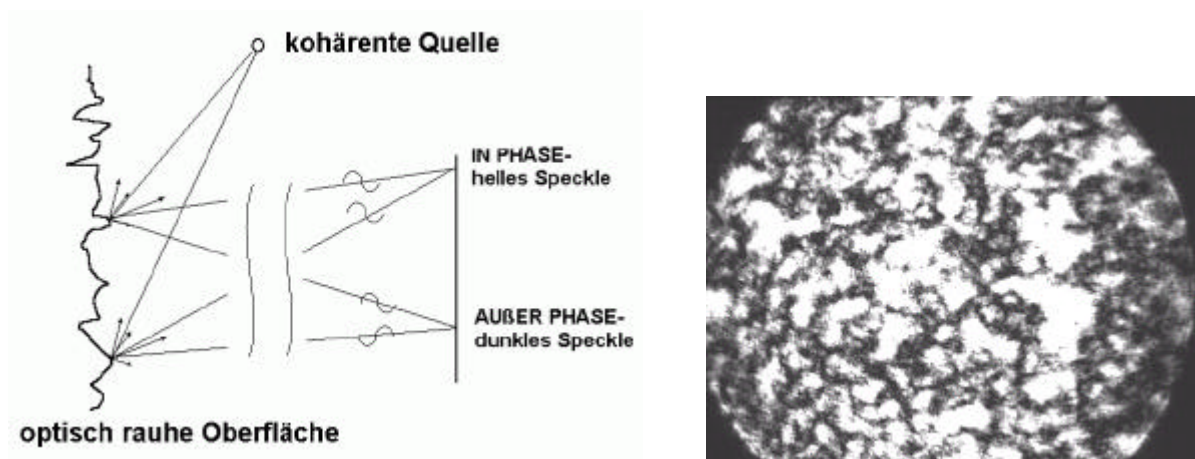


Abbildung 3.1 Entstehung eines Specklemusters

Da die Profilpunktshöhen zufällig verteilt sind, erreichen die Wellen die Beobachtungsebene ebenso mit zufälligen Phasenzuständen. Diese Wellen interferieren in den einzelnen Raumpunkten miteinander und rufen lokale Auslösungen und Verstärkungen hervor. Ein

Specklemuster kann somit im allgemeinen so betrachtet werden, dass die Summen von zufälligen Wellen zufällige Intensitätsmodulationen erzeugen.

Die in direkter Reflexion und die in der Bildebene eines optischen Systems erscheinenden Speckles werden als zwei unterschiedlichen Erscheinungsgruppen betrachtet: objektive (Fernfeld-) oder subjektive (Bild-) Speckles.

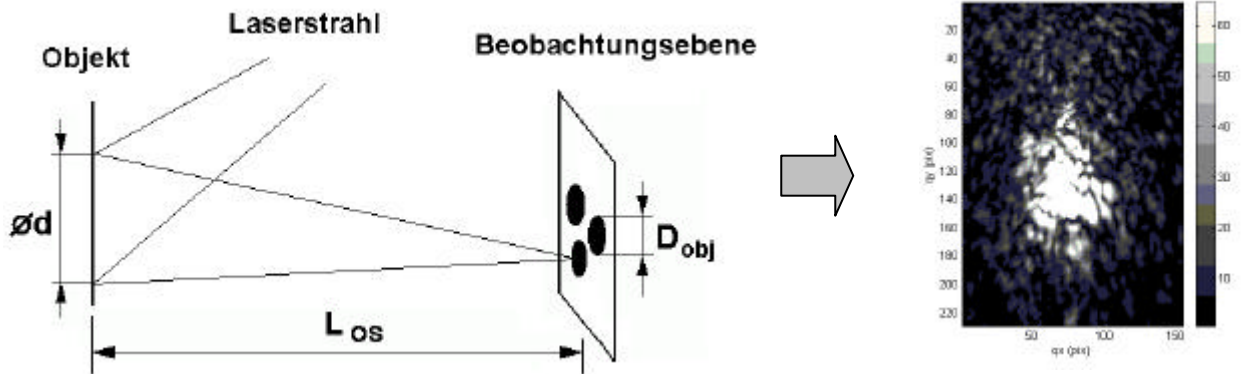


Abbildung 3.2 Entstehung eines objektiven Specklemusters im freien Streufeld

Ein typisches, in Direktreflexion ausgebildetes objektives Specklemuster ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Der Intensitätsablauf wird auf einem Schirm untersucht, der unmittelbar vor der beleuchteten Oberfläche steht. Es kann gezeigt werden, dass die durchschnittliche Specklegröße (Abstand zwischen lokalen Maxima bzw. Minima) dem Durchmesser einer Airy-Scheibe entspricht, die durch Fernfeld-Beugung hervorgerufen würde (Fraunhofer-Beugung) [14,27].

$$D_{obj} = k \frac{L_{os}}{d} \lambda \quad (3.1)$$

worin λ die Wellenlänge, d den Durchmesser des ausgeleuchteten Objektfeldes, L_{os} den Oberfläche-Schirm Abstand und k den Rayleigh-Koeffizienten (für kreisförmigen Strahl $k=1.22$) darstellt. Bei subjektiven Specklemustern steht jeweils ein optisches System zwischen der beleuchteten Oberfläche und der Beobachtungsebene (Abbildung 3.3). Die einzelnen Bildpunkte setzen sich dabei nur aus Wellen mit endlicher Anzahl zusammen, die an die Linsenapertur passieren können.

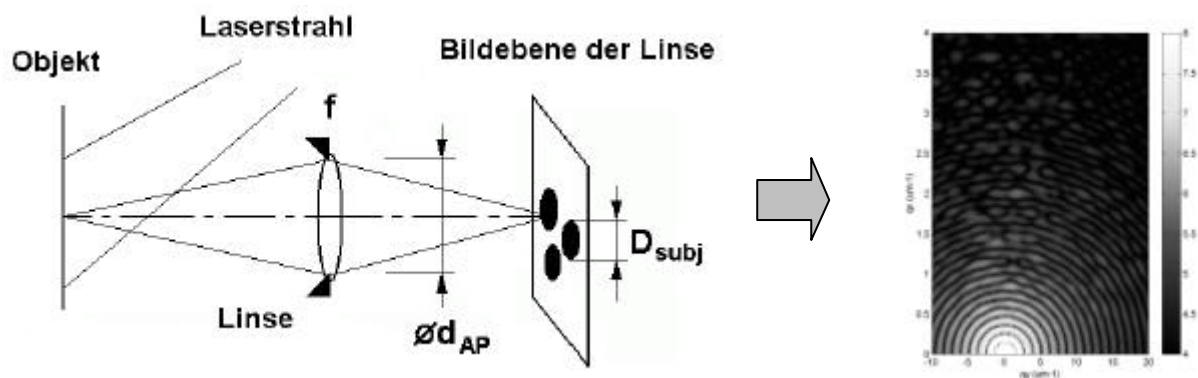


Abbildung 3.3 Entstehung eines subjektiven Specklemusters durch optische Abbildung

Somit wird das subjektive Specklemuster durch die Auflösungsgrenze des optischen Systems beeinflusst: die Linse bildet einen "Durchschnitt" innerhalb der Beugungsgrenze. Der mittleren Speckledurchmesser wird durch die Auflösungsgrenze des optischen Systems bestimmt [27].

$$D_{subj} = k \frac{l}{2NA} \approx k \frac{f}{d_{AP}} l \quad (3.2)$$

worin d_{AP} den Durchmesser der Apertur und f die Brennweite des optischen Systems darstellt (die numerische Apertur $NA = d_{AP}/2f$).

3.2. Auswertemöglichkeiten, Speckle-Kontrast und Speckle-Korrelation

Für praktische Rauigkeitsmessungen sind sowohl die objektiven als auch die subjektiven Specklemuster geeignet [27,71]. In Abschnitt 2.2. wurden die Auswertemöglichkeiten von Speckle-Intensitätsstrukturen bereits erwähnt; sie können der Abbildung 3.4 entsprechend klassifiziert werden.

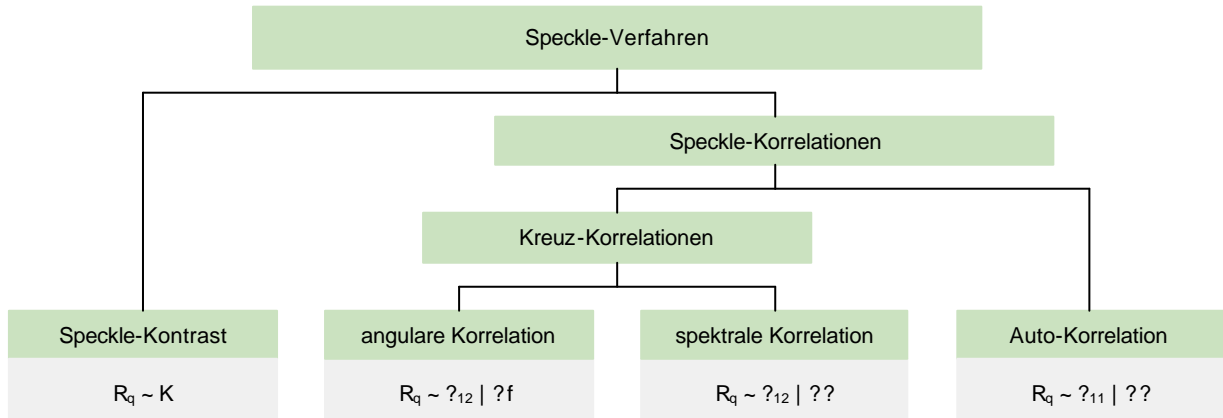


Abbildung 3.4 Klassifizierung der Speckle-Messmethoden

Charakteristisch für die objektiven Specklemuster ist, dass ihr Intensitätskontrast von der Rauigkeit der reflektierenden Oberfläche abhängt. Der Kontrast einer diskreten Verteilung wird nach der Formel (3.3) definiert:

$$K = \frac{s_I}{\langle I \rangle} = \frac{\sqrt{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}}{\langle I \rangle} \quad (3.3)$$

worin σ_I die Streuung der Intensitätswerte und $\langle I \rangle$ die Mittelintensität sind. In Anlehnung an die skalarer Theorie kann im Falle kastenförmiges Beleuchtungsprofils die folgende Beziehung abgeleitet werden [27]:

$$K(s_\Phi) = \sqrt{1 - e^{-2s_\Phi^2} \frac{1}{|e^{-s_\Phi^2} + (1 - e^{-s_\Phi^2})b|^2}} \quad \text{mit} \quad b = \frac{2d\sqrt{p}}{l} \quad (3.4)$$

worin s_Φ die Phasenstreuung der Wellenfront und d den Durchmesser der ausgeleuchteten Fläche darstellt. Dabei ist die Größe s_Φ proportional zum Rauigkeitsparameter R_q , denn es besteht der Zusammenhang $s_\Phi = k \cdot R_q$, wobei k die Wellenzahl $k = 2\pi/\lambda$ ist (zur Erklärung siehe Tabelle 2.2, Definition von R_q). Damit ist es möglich, den Kontrast in Abhängigkeit von der Standardabweichung der Phase zu veranschaulichen. Die theoretische Kontrastkurve (Abbildung 3.5) beginnt am Nullpunkt und nimmt mit der Phasenstreuung bis zum Maximalwert Eins zu. Der Parameter β hängt von der Wellenlänge des kohärenten Lichtes ab - die Steilheit der Kontrastkurve wird daher durch das angewendete Lichtspektrum

beeinflusst. Bilder in Abbildung 3.6 zeigen die zentralen Bereiche der von unterschiedlich rauhen Silizium-Oberflächen erhaltenen Specklestrukturen.

Speckleverteilungen, deren Kontrast kleiner als Eins ist, werden als teilweise ausgebildeten Speckles genannt. Sie treten bei solchen schwach streuenden Oberflächen auf, deren R_q -Rauigkeit kleiner als das Viertel der angewendeten Lichtwellenlänge ist: $R_q < \lambda/4$. Dabei dominiert eine spekulare Reflexion und die diffuse Streulichtintensität - die das Specklemuster verursacht - wächst proportional zur Rauigkeit. Dieser Effekt liegt für die Speckle-Kontrast Vermessungen zugrunde, mit den eine parametrische Rauigkeitsmessung relativ glatter Oberflächen einfach gelöst werden kann.

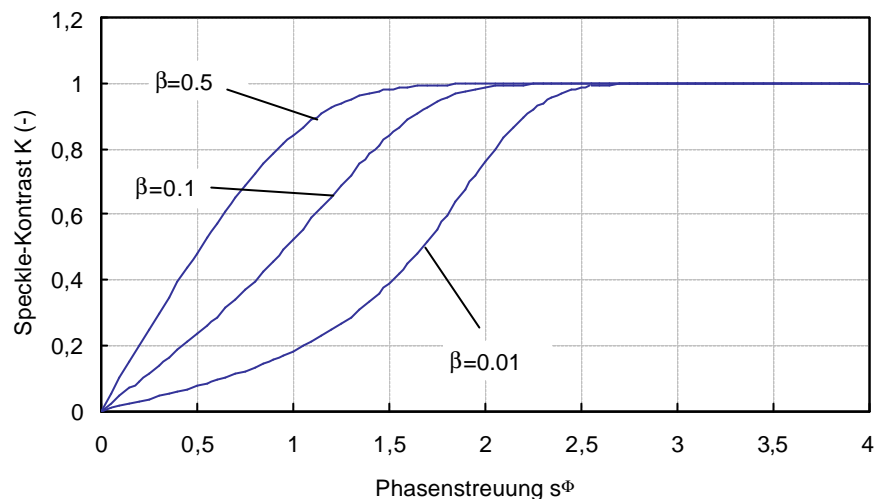


Abbildung 3.5 Speckle-Kontrast in Abhängigkeit der Phasenstreuung

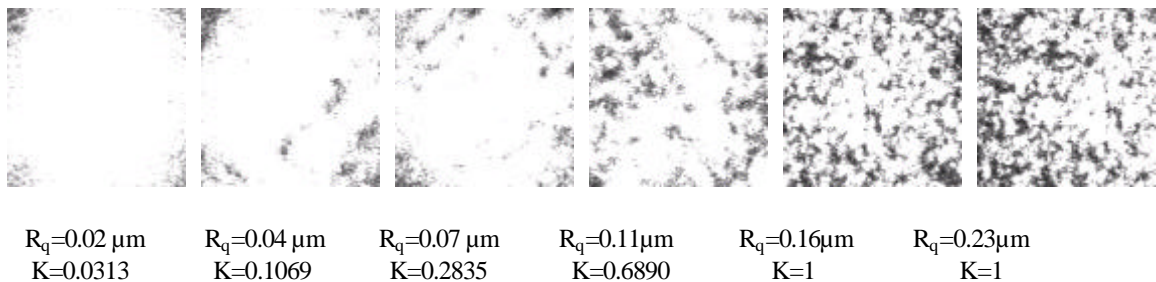


Abbildung 3.6 Speckleverteilungen von unterschiedlich rauhen Oberflächen

Dagegen werden Verteilungen, deren Kontrast Eins beträgt, voll ausgebildete Specklemuster genannt und sind für Oberflächen mit einer Rauigkeit größer als das Viertel der Lichtwellenlänge ($R_q > \lambda/4$) charakteristisch. Dabei verschwindet das spekulare Bündel und dominiert eine rein kohärente Streuung.

Eine andere Gruppe der Speckle-Oberflächenanalysen stellen die Korrelationstechniken dar. Dabei wird der optische Rauigkeitsparameter auf die Konformität der Verteilungen zurückgeführt, die unter kleiner Änderung im Strahlengang aufgenommen wurden. Grundsätzlich kann zwischen zwei Methoden unterschieden werden: das spektrale- und angulare Korrelationsverfahren.

Für das Erstere wird eine dichromatische Beleuchtung verwendet. Man beobachtet dabei die Korrelation zwischen Verteilungen, die mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen

aufgenommenen werden. Beim Letzteren werden die Proben mit denselben Wellenlängen beleuchtet, der Einfallswinkel und der Beobachtungswinkel werden aber variiert. In beiden Fällen wird der optische Rauheitsparameter durch den Kreuz-Korrelationskoeffizienten gegeben:

$$r_{12} = \frac{\langle (\langle I_1 \rangle - I_1) \cdot (\langle I_2 \rangle - I_2) \rangle}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (3.5)$$

wobei σ_1 und σ_2 die Streuungen der Verteilungen I_1 und I_2 sind. Ihr Vorteil ist der breitere Messbereich im Vergleich zur Speckle-Kontrast Methode ($R_q < 3-5 \mu\text{m}$), sie sind jedoch nur bei voll ausgebildeten Specklestrukturen einzusetzen.

Zur theoretischen Untersuchung der Speckle-Korrelation werden die objektiven oder subjektiven Speckle-Anordnungen als lineare optische Übertragungssysteme betrachtet und der Korrelationskoeffizient wird aus der Übertragungsfunktion abgeleitet. In Hinsicht dieser Arbeit sind allerdings die Rauigkeitsabhängigkeiten der Korrelationskoeffizienten wesentlich. Im Falle der spektralen Korrelation ist dies [65,66]:

$$r_{12}(I_1, I_2) = e^{-\left(4pR_q \cos j \left(\frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1}\right)\right)^2} = e^{-\left(4pR_q \cos j \left(\frac{4\Delta I}{I^2 - \Delta I^2}\right)\right)^2} \quad (3.6)$$

Mit wachsender Wellenlängenabweichung fällt die Reziprok-Differenz ab, die Korrelation steigt. Sind die beiden Wellenlängen identisch, so ist die Hochzahl Null, die Korrelation erreicht den Extremwert Eins. Abbildung 3.7 stellt die Formel (3.6) für eine Mittelwellenlänge von $\lambda=600 \text{ nm}$ und für unterschiedliche $\Delta\lambda$ Werte graphisch dar.

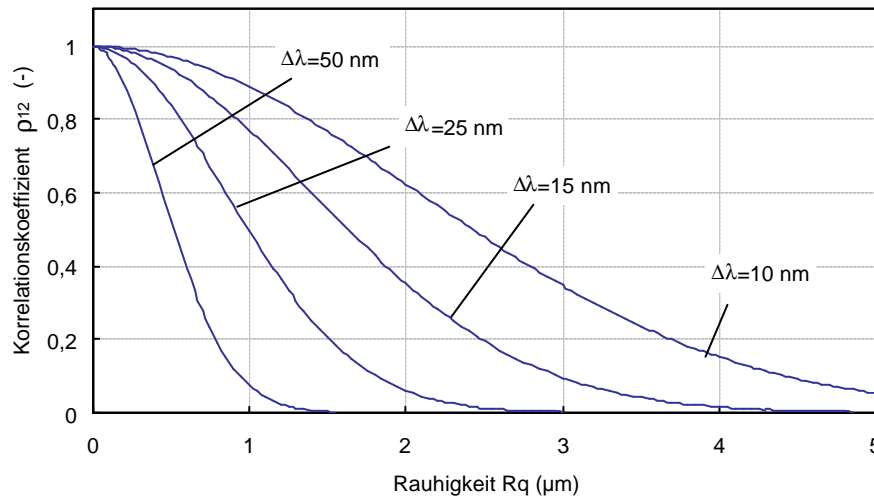


Abbildung 3.7 Theoretischer Zusammenhang zwischen spektralem Korrelationskoeffizienten und Rauigkeit

Die theoretische Rauigkeitsabhängigkeit der angularen Korrelation lässt sich ebenso aus der Übertragungsfunktion der Speckle-Anordnung ableiten, für objektive Specklestrukturen gilt [65,66]:

$$r_{12}(I_1, I_2) = e^{-(2R_q k \Delta f \sin j)^2} \quad (3.7)$$

Diagramm 3.8 stellt die Formel (3.7) für $\lambda=600 \text{ nm}$ Wellenlänge und für $\varphi=45^\circ$ Beobachtungswinkel mit unterschiedlichen $\Delta\varphi$ -Werten dar.

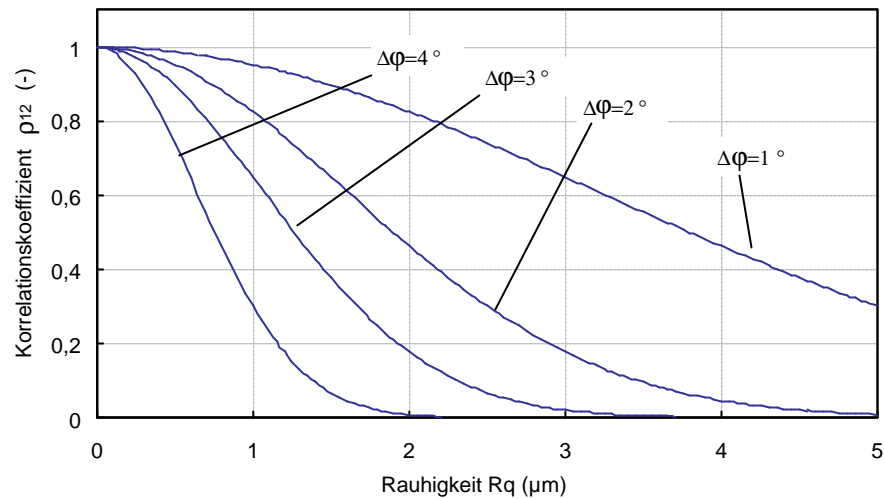


Abbildung 3.8 Theoretischer Zusammenhang zwischen angularem Korrelationskoeffizienten und Rauigkeit

Die Zunahme jeglicher Beleuchtungsänderung ($\Delta\lambda$ oder $\Delta\phi$) führt zu einer deutlichen Dekorrelation zwischen den Speckleverteilungen. Wesentlich ist, dass der Wellenlängenunterschied und die Winkeldifferenz die Steilheit der Charakteristik (und damit die Genauigkeit und den Messbereich der Speckle-Korrelationsmethode) beeinflussen.

3.3. Auto-Korrelation der Specklemuster und die mittlere Specklegröße

Der Auto-Korrelationskoeffizient charakterisiert die laterale Specklestruktur und wird praktisch zur Berechnung der durchschnittlichen Specklekorngöße benutzt. In der Praxis wird der Auto-Korrelationskoeffizient nach der folgenden Formel berechnet:

$$r_{11}(\Delta \mathbf{x}) = \frac{\langle (\langle I \rangle - I') \cdot (\langle I \rangle - I) \rangle}{S_I^2} = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{S_I^2} \quad (3.8)$$

wobei I' die um $\Delta \xi$ verschobene Funktion der Originalverteilung I repräsentiert. Geht man wiederum von der Übertragungsfunktion der objektiven Speckle-Anordnung aus, so berechnet sich der Auto-Korrelationskoeffizient eines objektiven Specklemusters für Beobachtungswinkel $\varphi=0^\circ$ zu [65]:

$$r_{11}(\Delta \mathbf{x}) = e^{-\left(\frac{2pD}{1L} \Delta \mathbf{x}\right)^2} \quad (3.9)$$

Der mittlere Speckledurchmesser wird durch eine Verschiebung $\Delta \xi$ festgelegt, wobei die Auto-Korrelationsfunktion auf $1/e$ zurückfällt. Setzt man den Ausdruck (3.9) mit e^{-1} gleich, ergibt sich für durchschnittliche Specklekorngöße:

$$D_{sp} = |\Delta \mathbf{x}|_{r_{11}=1/e} = \frac{4}{p} \cdot \frac{L_{os}}{d} I \quad (3.10)$$

worin d den Durchmesser der ausgeleuchteten Fläche und L_{os} den Objekt-Schirm Abstand kennzeichnet. Der Speckledurchmesser ist proportional zur Wellenlänge und zum Schirmabstand und steht im umgekehrten Verhältnis zur beleuchteten Spotgröße (Abbildung 3.9).

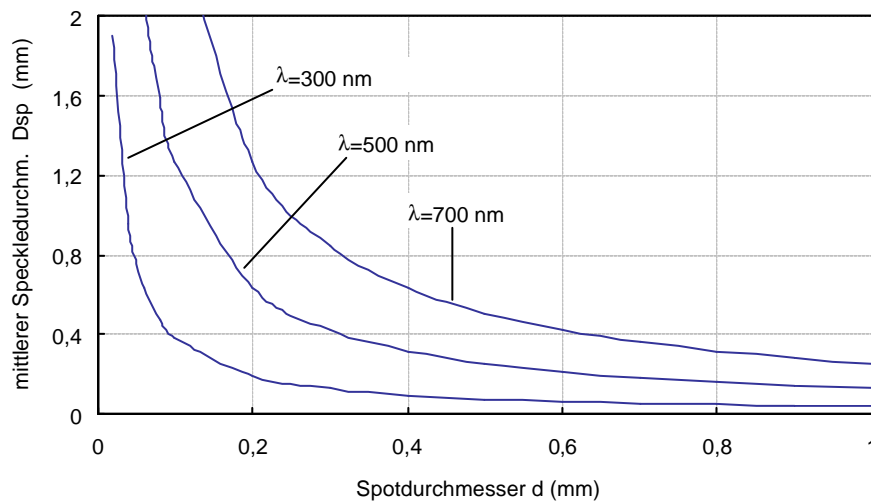


Abbildung 3.9 Mittlerer Specklekorndurchmesser als Funktion des Spotdurchmessers

Die nachstehenden Aufnahmen wurden mit einem HeNe-Gaslaser ($\lambda=633$ nm) angefertigt, der mit Hilfe einer $f=5$ mm Kollimatorlinse auf eine Silizium-Oberfläche fokussiert wurde. Bei Objektsbewegung in Richtung der optischen Achse wurde die Oberfläche unter

unterschiedlich großen Durchmessern angestrahlt und folglich veränderte sich der Durchmesser der Speckles im Reflexionsspot.

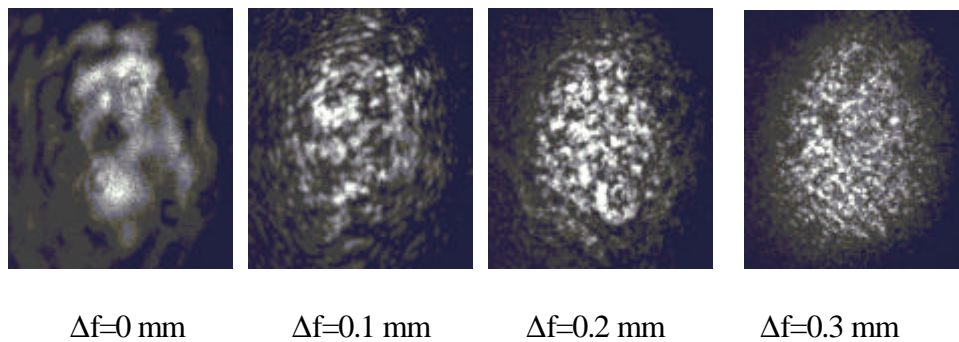


Abbildung 3.10 Objektive Specklemuster unter unterschiedlichen Defokussierungen (Spotgrößen)

Einige Autoren stellen den Auto-Korrelationskoeffizienten in direkten Zusammenhang mit der Rauigkeit dar und damit wird die Kenngröße ρ_{11} als optischer Rauigkeitsparameter verwendet [25]. Dabei ist eine begrenzte Messmöglichkeit zu entdecken, was kein Zufall ist: im Falle teilweise ausgebildeter Specklemuster stehen der Auto-Korrelationskoeffizient und der Kontrast im engen Zusammenhang miteinander (siehe (3.3) und (3.8)).

Kapitel 4.

Entwicklung eines Messsystems zur Analyse vertikaler Mikrostrukturbereiche

Unter Anwendung der theoretischen Beziehungen aus dem vorherigen Kapitel wird das Funktionsprinzip der Messanordnung vorgestellt. Die wesentlichen Konstruktionsaspekte werden ausführlich behandelt und das realisierte Messsystem sowie die Auswertungssoftware werden beschrieben. Ein räumlicher Filterungsprozess wird entwickelt, mit dem die von umliegenden Flächen gestreuten Störsignale unterdrückt werden können.

4.1. Theoretische Grundlagen und das Aufbaukonzept

Die im vorigen Kapitel vorgestellten Auswertungsmethoden können für Untersuchung der Seitenwände von Werkzeugstrukturen verwendet werden, wenn die entsprechende Beleuchtung gesichert werden kann und das reflektierte Specklefeld sich - vollständig oder teilweise - detektieren lässt. In diesem Fall erfüllt die Methode die meisten Anforderungen, die im Kapitel 2.2. aufgestellt wurden.

Anforderungen an die Beleuchtung sind die Zuleitung der entsprechenden Lichtleistung (5-10 mW), die isolierte, lokale Beleuchtung der Seitenwand und der möglichst kleine Laserspot ($<20\text{ }\mu\text{m}$). Eine Lösung kann sein, dass man eine optische Komponente (Spiegel, Prisma, Glasfaser) über die Struktur positioniert, die das Laserbündel auf die Grabenwand umlenkt. Dadurch könnte ein relativ hoher Einfallswinkel erreicht werden, was die Untersuchung auch schmalerer Gräben ermöglicht. Die für Lichtzufuhr verwendete Komponente könnte jedoch das Auffangen des Specklefeldes behindern. Im Falle einer optischen Faser wäre der Ausgangsstrahl sehr divergent und die für Kollimierung erforderliche Optik würde die Speckle-Detektierung ebenfalls verhindern. Daraus ergibt sich, dass es hinsichtlich der Beleuchtung vorteilhaft ist, wenn jegliche optische Komponente möglichst weit von der zu prüfenden Oberfläche liegt.

Eine zweite Möglichkeit ist, das Laserbündel unter einem bestimmten Winkel unmittelbar auf die vertikale Oberfläche zu lenken. Dann setzt die Lichtleistung keine Grenzen, die kleine Spotgröße lässt sich mit Strahlfokussierung realisieren, allein die Einstellung vom Einfallswinkel und die genaue Positionierung von Probenoberfläche erfordern die

Aufmerksamkeit. Dieser Fall ist in Abbildung 4.1 veranschaulicht. Der Laserstrahl wird direkt an die Seitenwand fokussiert; wegen der kleinen Spotgröße erscheint ein ausgedehntes Specklemuster über der Struktur.

Eine andere Frage der Konstruktion stellt die Erfassung des so ausgebildeten Specklemusters dar: der Ort, die Richtung sowie die Art (subjektiv-objektiv) der Detektierung. Erschwernis dabei ist, dass das Messsignal (das Specklemuster) nur direkt über dem Einfallsbündel detektierbar ist. Auch hier kann die Abführung des Reflexionssignals in Frage kommen, das Specklemuster könnte in vertikaler Richtung nach oben ausgekoppelt werden. Man könnte in dieser Weise nur ein Teil des Specklefeldes detektieren, weil das Prisma wegen des Einfallsbündels nicht unmittelbar vor die Strukturwand positioniert werden kann: ein großer Teil des Streufeldes wäre verloren. Zur optimale Detektierung ist es zweckmäßig, die Aufnahmeebene von der Seitenwand möglichst zu entfernen und das Reflexionsfeld über dem Einfallsstrahl in einem möglichst breiten Raumteil zu detektieren.

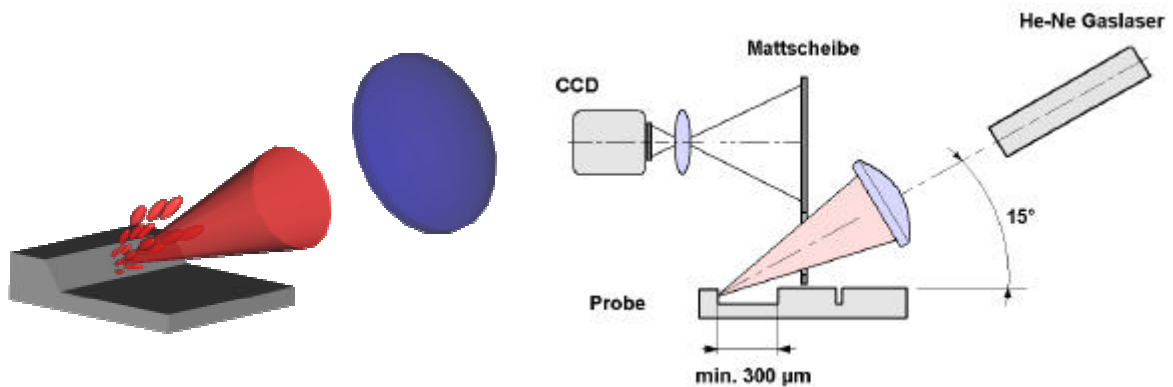


Abbildung 4.1 Theoretische Anordnung für die Detektion des Specklemusters an einer Strukturwand

Dieser letztere Punkt (Erfassung eines möglichst großen Raumteils) stellt die wichtigste Anforderung an die Detektierung dar und bildet zugleich einen Ausgangspunkt für die Feststellung der Detektierungsart. Das subjektive Specklemuster wird nämlich durch ein optisches System abgebildet, das den Raum jeweils nur innerhalb eines Aperturwinkels erfassen kann. Falls man das Specklefeld in einer Ebene des interessierenden Bereiches als objektives Muster beobachtet, kann der gesamte Reflexionsbereich auf einem Schirm mit einer darauf gerichteten CCD-Sensor-Objektiv-Einheit detektiert werden. Eine derartige Anordnung ist in Abbildung 4.1 dargestellt, wobei eine über den Einfallsstrahl positionierte Mattscheibe die Aufnahmeebene darstellt. Zwischen der Oberfläche und der Aufnahmeebene befinden sich keine optischen Abbildungselemente, auf der Mattscheibe erscheint eine objektive Specklestruktur.

Die nächsten zwei Abbildungen (4.2/b, 4.2/c) zeigen Verteilungen, die mit der obigen Anordnung aufgenommen wurden. Ein Unterschied zwischen beiden Aufnahmen ist, dass die geprüften Proben unterschiedlichen Seitenwandneigungen besaßen (die optische Achse des Lasers stand in beiden Fällen in einem festen Winkel von 15° zur Waagerechten). Im folgenden verstehen wir unter Seitenwand-Neigung jeweils den in Abbildung 4.2/a dargestellten Winkel α - den Winkel zwischen der vertikalen Oberfläche und der waagerechten Waferfläche. Das linke Bild zeigt ein Specklemuster, wobei der Neigungswinkel der Wänden 55° betrug. Da die Abweichung des Winkels α von 90° größer als der lokale Einfallswinkel ist, so erschien das vollständige Streufeld auf der Mattscheibe.

Derartige Reflexionen lassen sich mit der im Kapitel 3. vorgestellten Kontrast- und Korrelationsmethoden unmittelbar auswerten.

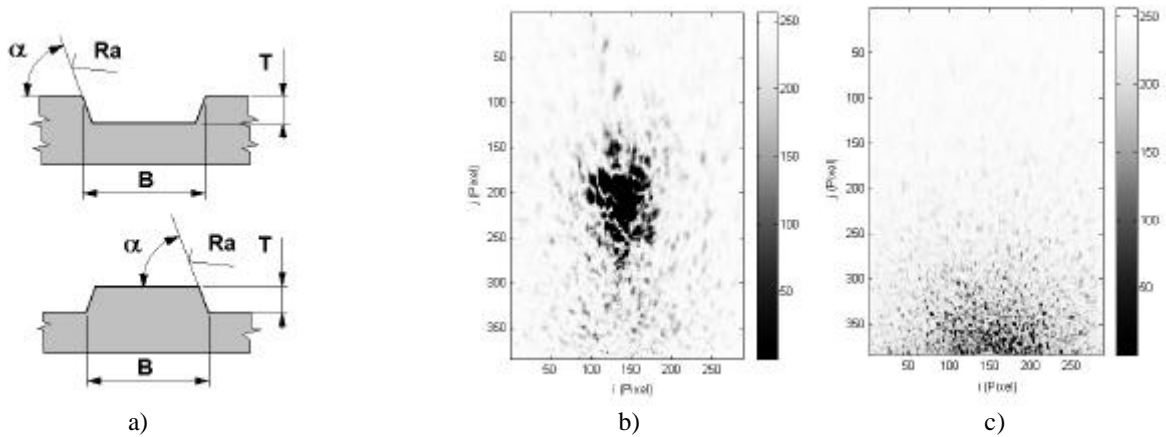


Abbildung 4.2 a) Definition des Neigungswinkels von Strukturwand b) vollständige Specklevertei- lung durch direkte Reflexion c) teilweise Specklevertei- lung bei steilen Strukturwänden

Im rechten Bild war dagegen die seitliche Fläche der Si-Struktur ganz senkrecht zur oberen Waferfläche ($\alpha=90^\circ$). Dieser Fall ist von praktischer Bedeutung, da die Abformwerkzeugen meistens beinahe senkrechte Seitenwände aufweisen. Es wird deshalb in folgendem diese Möglichkeit behandelt.

Die Hauptrichtung der Reflexion zeigt nun in Richtung des Grabenbodens, so erschien kein direkter Reflexionsspot am Schirm. Es kann jedoch eine starke Intensitätsstruktur in der Beobachtungsebene entdeckt werden, die ein Teil vom durch die Seitenwand verursachten kohärenten Specklefeld darstellt. Es ist naheliegend (und die vorherigen Untersuchungen wiesen auch daraufhin), dass die für objektive Speckle getroffenen Feststellungen auch in diesem Fall gelten: der Kontrast des detektierbaren Specklefeldes nimmt mit der Rauigkeit proportional zu, die Korreliertheit sinkt.

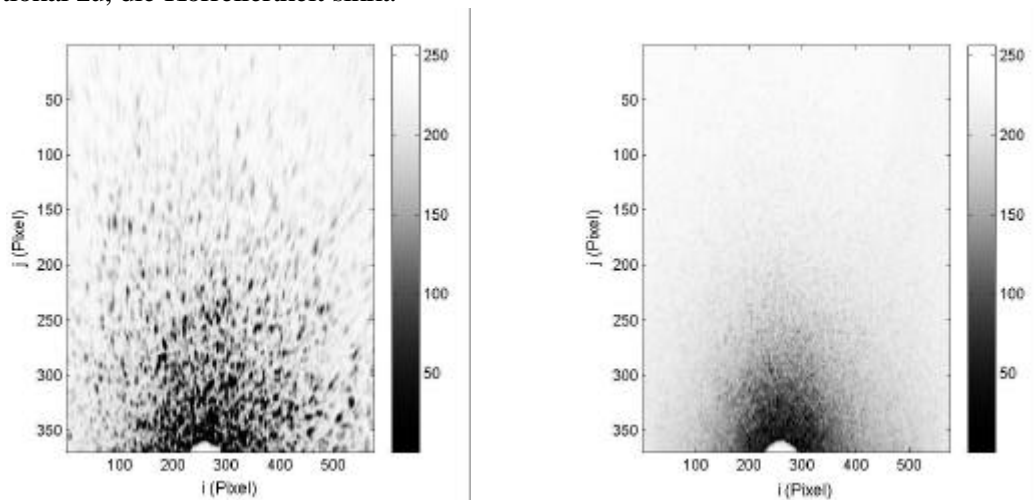


Abbildung 4.3 Speckles von primärer Reflexion (links) und sekundärer Reflexion (rechts)

Bei Auswertung derartiger Specklefelder muss man aber in Betracht ziehen, dass die Reflexionen, die sich in Richtung der unteren Waferflächen fortpflanzen, eine sekundäre Störsignal hervorrufen. Folgende Abbildungen stellen solche Verteilungen dar, wobei entweder die bei Seitenwand auftretende primäre Reflexion oder die von umliegenden

Flächen gestreute sekundäre Reflexion ausgeblendet wurde (beide Verteilungen sind auf einer 8-Bit Skala (0..255) normiert).

Der Unterschied zwischen den Verteilungen ist gut ersichtlich: die Ortsfrequenz des primären Specklemusters ist niedriger, während die von der Umgebung gestreute Störung eine solche asymmetrische Intensitätsverteilung hervorbringt, die durch eine höhere Ortsfrequenz charakterisiert werden kann. Dies ist in den folgenden Pixel-Grauwert Diagrammen für Koordinate $x=288$ und in den Fourier-Spektra der Verteilungen eindeutiger zu erkennen.

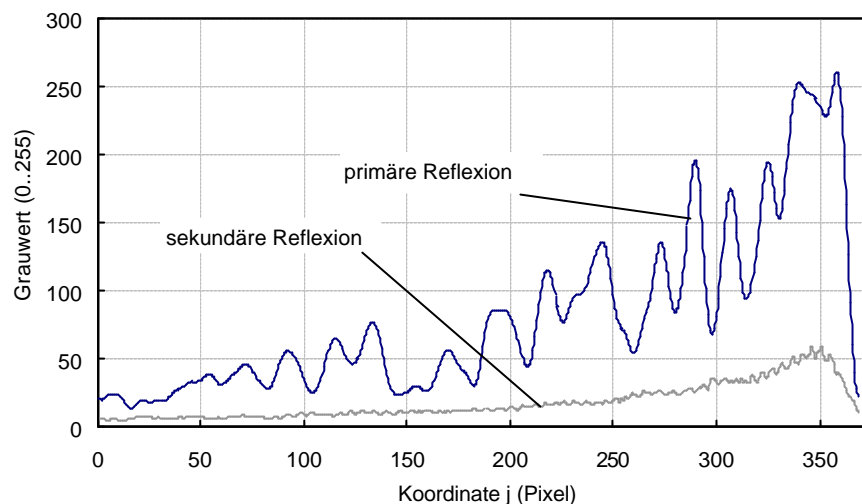


Abbildung 4.4 Intensitätsprofile der Specklemuster von primären und sekundären Reflexionen

Es ist noch zu bemerken, dass obwohl bei senkrechten Seitenwänden der größte Teil der Lichtleistung nicht in der primären Specklestruktur erscheint, wegen der niedriger Reflektivität vom Silizium (ca. 30 %) und wegen der starken Streuung beträgt die Intensität der sekundären Störreflexion nur 15-20 % von der primären Speckleintensität. Dieses Verhältnis - das sich abhängig von der Seitenwandrauigkeit verändern kann - wird durch das proportional dargestellte Störsignal in Diagramm 4.4 gut veranschaulicht. Im obigen Diagramm wurden die Grauwerte zwecks der Sichtbarkeit mit Normierung auf 8-Bit wiedergegeben.

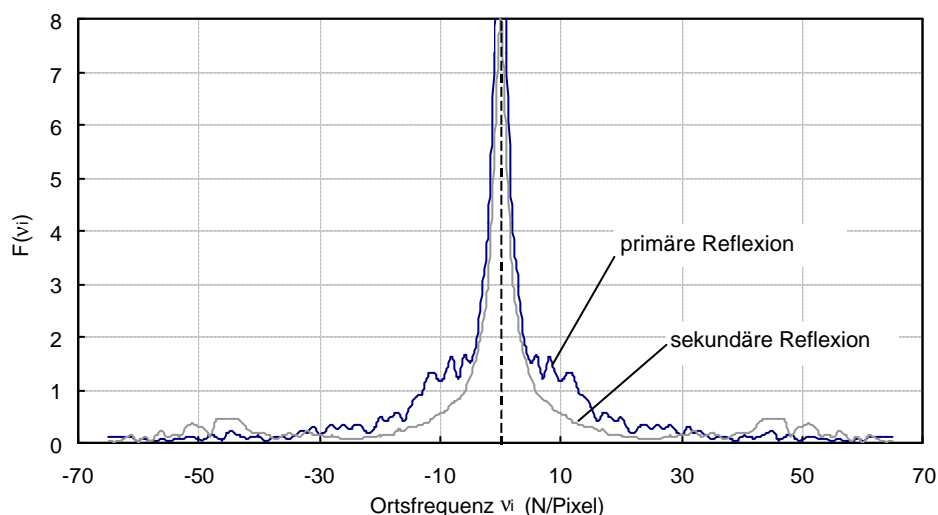


Abbildung 4.5 Ortsfrequenzspektra der Verteilungen von Abbildung 4.4

Die Abbildung 4.5 stellt die Querschnitte $v_i=0$ der Fourier-Spektren von den Verteilungen 4.4 dar. Während im zentralen Bereich kein Unterschied zwischen beiden Spektren zu entdecken ist, weisen die Kurven erhebliche Abweichungen für Ortsfrequenzen $v_i > 5-10$ N/Pixel auf. Das Spektrum der primären Reflexionsverteilung zeigt im Bereich von 5-30 N/Pixel, und das Spektrum der sekundären Reflexion im Bereich von 35-60 N/Pixel höhere Werte. Dies entspricht unseren Erwartungen, da die Ortsfrequenz des primären Speckles auch in der Originalverteilung anscheinend niedriger ist als die des Störsignals. Die relativ breiten Frequenzbereiche können daraus entstehen, dass die Mattscheibe nicht senkrecht zur optischen Achse des Lasers steht und damit das gestreute Specklemuster schräg auf die Beobachtungsebene fällt. Dies verursacht eine geringe Veränderung in den Ortsfrequenzen v_i entlang der Koordinate i .

Zur Erläuterung des Periodizitätsunterschieds beider Verteilungen betrachten wir die Abbildung 4.6 sowie die Formel (3.10), die als eine Beziehung zwischen der beleuchteten Flächengröße (oder Strahldurchmesser) und der mittleren Specklegröße abgeleitet wurde.

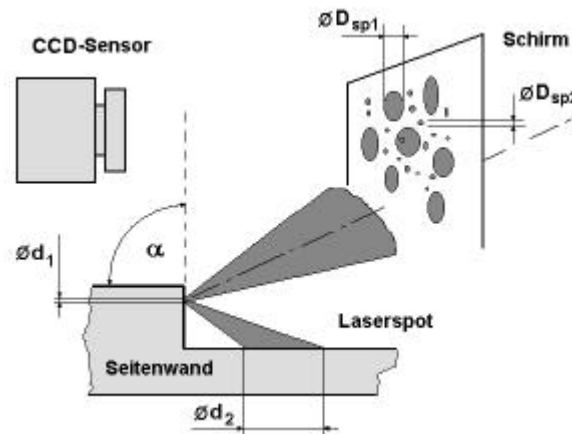


Abbildung 4.6 Entstehung der Speckles an einer Seitenwand

Da der Laserstrahl auf die seitliche Oberfläche stark fokussiert wird, hat der Laserspot einen relativ kleinen Durchmesser von 20-30 μm an der Seitenwand. Das an der Seitenwand reflektierte Bündel leuchtet die herumliegenden Flächen einerseits wegen der Strahldivergenz andererseits wegen der primären Streuung auf einer größeren Fläche (mehrere mm) aus. Nach der Beziehung (3.10) stehen aber die beleuchtete Spotgröße und der mittlere Specklekorndurchmesser in einem Reziprok-Verhältnis zueinander, wie es in Abbildung 3.9 im Kapitel 3.3 dargestellt ist. Dies spiegelt sich dann in den typischen Ortsfrequenzen der primären und sekundären Reflexionen wieder: das von Seitenwand reflektierte Specklemuster ruft wegen des kleinen Laserspots einen größeren Korndurchmesser und dadurch eine niedrigere Ortsfrequenz hervor, während die sekundäre Reflexion wegen der ausgedehnten Beleuchtung durch eine kleine Korngröße und eine hohe Ortsfrequenz charakterisiert wird.

Die beschriebene Erscheinung schafft zugleich die Grundlage, die durch die Seitenwand verursachte Reflexion und die von der Umgebung gestreuten Lichtkomponenten zu trennen. Die störenden Hochfrequenz-Signale lassen sich mit räumlicher Filterung beseitigen. Da die Verteilungen mit niedrigeren Ortsfrequenzen (ausgedehnte Specklestruktur) vor allem durch die primäre Reflexion ausgelöst werden, kann die Rauigkeit mit der Kontrast- und Korrelationsanalyse der gefilterten Verteilung für vertikale Flächenbereiche berechnet werden.

Das Grundprinzip des Messaufbaus lässt sich folgenderweise zusammenfassen:

- die Seitenwände werden unter einem entsprechenden Winkel mit stark fokussiertem Laserbündel direkt beleuchtet
- die reflektierten objektiven Specklemuster werden über der Probe in einem möglichst großen Raumteil erfasst und mit einer CCD Kamera-Objektiv Einheit als "Lichtbilder" aufgenommen
- bei starker Seitenwandneigung wird die Periodizität der Specklestruktur und die Abhängigkeit deren Ortsfrequenz vom Bündeldurchmesser ausgenutzt; die störenden Lichtkomponenten, die aus mehrfachen Reflexionen stammen, werden mit räumlicher Filterung beseitigt
- die erhaltenen Gesamtreflexionen oder die störungsfreien (gefilterten) teilweisen Verteilungen werden mit Kontrast- und Korrelationsmethoden ausgewertet

4.2. Konstruktion des Messsystems

Der realisierte Messaufbau wendet eine monochromatische Lichtquelle an, mit der lediglich die spektrale Kreuz-Korrelation von den Speckle-Auswertungsmethoden nicht auszuführen ist. Die konstruktiven Aspekte, die hinsichtlich der im Kapitel 2. vorgestellten Messprinzipien wesentlich sind, können in drei Gruppen eingeteilt werden: Anforderungen an die Beleuchtung, entsprechende Positionierung der Probe und die Aspekte des Bildeinzuges.

1. Beleuchtung:

- hohe räumliche und zeitliche Kohärenz
- Einstellbarkeit der Lichtintensität
- möglichst langer Arbeitsabstand (20-30 mm) aber hohe Strahlkonvergenz und geringer Laserspotdurchmesser im Brennpunkt der Fokussierlinse
- Positionierbarkeit der Fokussierlinse der optischen Achse entlang (Fokus-Justierung)
- Veränderlichkeit des Einfallswinkels (angulare Kreuz-Korrelation)

2. Positionierung der Probe:

- rechnerisch steuerbare Positionierung des Probenwafers in seiner Lagenebene in zwei Koordinaten (X,Y) mit einem Bewegungsbereich von mindestens 50x50 mm und 1 µm Genauigkeit
- zusätzliche automatisierte oder manuelle Positionierbarkeit senkrecht zur Lagenebene (Z) wegen eventuellen Dickenunterschieden von Werkzeugen
- Kontrollierbarkeit der genauen Positionierung

3. Detektierung:

- Arbeitsabstand von mindestens 40-50 mm
- Detektierbarkeit eines Raumteiles von 60x60 mm
- ein dynamischer Bereich von mindestens 8 Bit, Geschwindigkeit 10 Bilder pro Sekunde
- rechnerische Steuerbarkeit des Sensors: Einstellung von Integrationszeit, AOI, etc..

Abbildung 4.7 zeigt die optische Anordnung des realisierten Aufbaus in der Draufsicht.

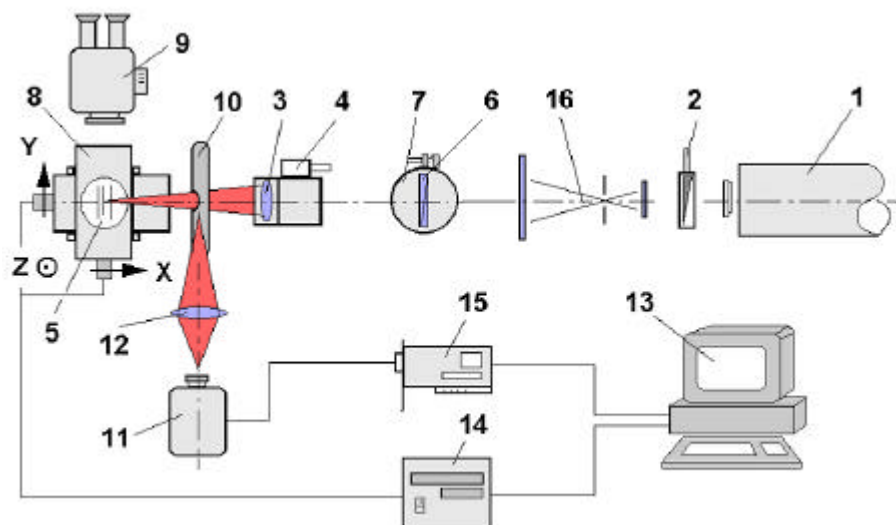


Abbildung 4.7 Optische Anordnung des Messsystems

Als Lichtquelle dient das He-Ne Gaslasermodule (1) mit 15 mW Leistung und 633 nm Wellenlängenbereich. Seine Vorteile gegen die Halbleiter-Laser sind die hohe räumliche Kohärenz, die niedrige Strahldivergenz, der zirkuläre Strahlquerschnitt und die regelmäßige Intensitätsverteilung des Laserbündels. Die Strahlintensität lässt sich mit einem vor den Laser positionierten Neutralfilter (Graukeil) (2) einstellen. Das Laserbündel wird durch eine Linse (3) mit $f=30$ mm Brennweite auf die Oberfläche der zu untersuchenden Struktur (4) fokussiert, deren Justierung in Richtung der optischen Achse mit einer Mikrometerspindel (5) möglich ist. In der Beleuchtungsbahn befindet sich noch eine planparallele Platte (6), die in einer drehbaren Einfassung (7) fixiert ist. Mit dieser Komponente kann das Laserbündel senkrecht zur optischen Achse geringfügig verschoben werden. Dies ergibt in der Bildebene der Linse (3) eine Winkeländerung, damit ist die für angulare Korrelation notwendige Verstellbarkeit des Einfallswinkels realisiert.

Die Strukturproben können mit dem Kreuztisch Märzhäuser Scan 100x100 (8) positioniert werden, der die gesteuerte Bewegung in Lagenebene der Struktur in zwei Richtungen (XY) ermöglicht. Die Auflösung des Kreuztisches beträgt $0.0015\text{ }\mu\text{m}$ mit einer Wiederholgenauigkeit von $0.5\text{ }\mu\text{m}$. Zwecks vertikaler Positionierbarkeit wurde zusätzlich ein manueller Höhenverstellstisch auf den Kreuztisch befestigt, auf dem das zu untersuchende Objekt liegt. Bei der Fokussierung und bei der genauen Positionierung des Laserspots hilft das Beobachtungsmikroskop (9).

Das durch die Seitenwand hervorgerufene Specklemuster projiziert sich auf die Mattscheibe (10), das durch einen monochromatischen $1/2''$ CCD-Sensor (11) mit einer Auflösung von 768×576 Pixel und 8 Bit dynamischem Bereich (Watec 902B) detektiert wird. Das Weitwinkel-Objektiv F1.4/3.5-8 (12) bildet die Mattscheibe an die Sensorebene ab.

Der Messrechner (13) steuert den Kreuztisch durch einen Steuermodul (14) und zieht gleichzeitig die Bilder der Speckleverteilungen vom CCD-Sensor durch eine Frame-Grabber Karte (15) ein.

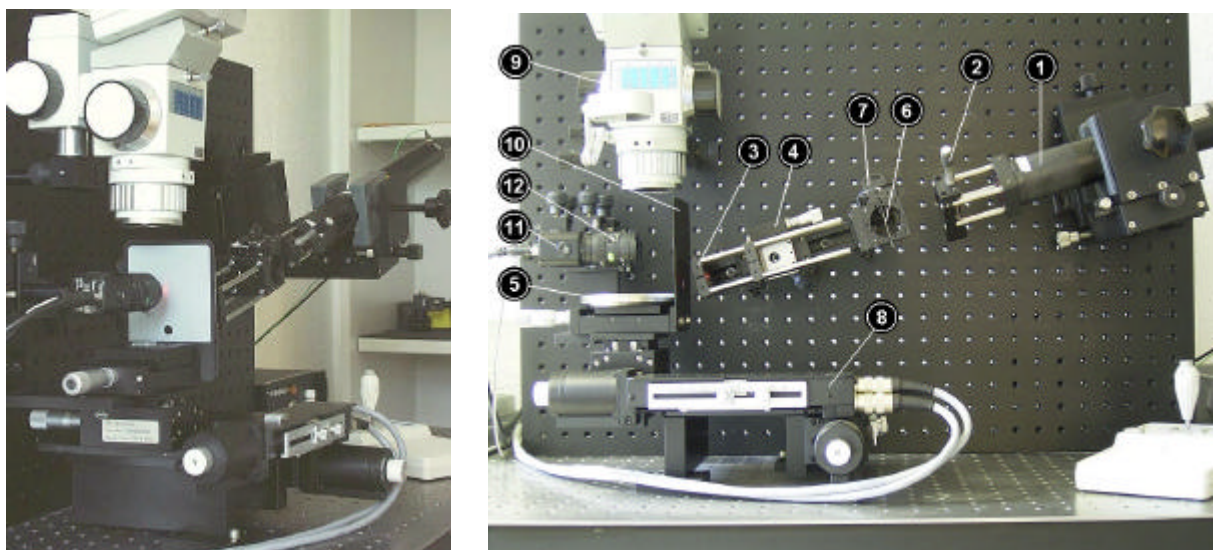


Abbildung 4.8 Gesamtansicht des Messsystems

Die durch den Lasermodule, die planparallele Platte und die Fokussierlinse gebildete optische Achse schließt einen Winkel von 15° mit der Lagenebene der Probe. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist, dass die Kamera und die Mattscheibe von der Kreuztischbewegung unabhängig befestigt wurden, damit der Brennpunkt der Beleuchtung, die Beobachtungsebene

und ihre Abbildung räumlich fixiert sind und die geometrischen Abstände sich nicht verändern.

Zwei Berechnungen waren hinsichts der Konstruktion unerlässlich: die Bestimmung der Dicke und die erforderliche Verdrehung der planparallelen Platte (6) sowie die Feststellung von Parametern für das Kameraobjektiv und für die Detektierung.

Nehmen wir die maximale Verdrehung der in die Beleuchtungsbahn gesetzten Glasplatte für 45° an. Die für angular Korrelation erforderliche Einfallswinkeländerung liegt nach den Literaturquellen [65,66,80] in einem Bereich von 0.1-0.2°. Ziel ist es, diese Winkeländerung neben einer maximalen Glasplattendrehung von 45° im Bildraum der Linse zu erreichen.

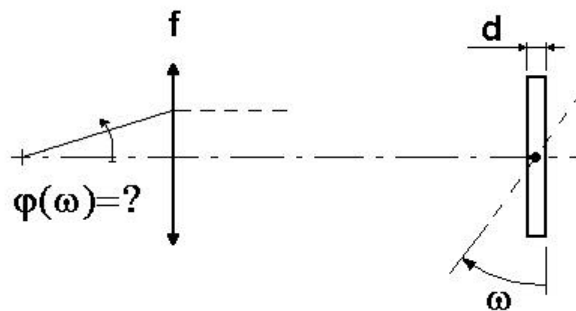


Abbildung 4.9 Erzeugung einer Einfallswinkeländerung durch Verdrehen der Glasplatte (6)

Bezeichnen wir die geometrischen Abmessungen nach Abbildung 4.9, dann ergibt sich die φ Einfallswinkelveränderung der Beleuchtung in Abhängigkeit der ω Winkelstellung der planparallelen Platte zu (ohne Ableitung):

$$j(\omega) = \arctan \left[\frac{d}{f} \frac{\sin \left[\omega - \arcsin \left(\frac{n}{n'} \sin \omega \right) \right]}{\cos \left[\arcsin \left(\frac{n}{n'} \sin \omega \right) \right]} \right] \quad (4.1)$$

worin d die Plattendicke, f die Brennweite der Linse bezeichnen; n und n' sind die Brechzahlen für Luft und Glas. Setzt man den Maximalwert von φ auf 0.5°, mit Umordnung der obigen Formel erhält man für die Glasplattendicke d=0,79.

| Winkelstellung (°) | Bündelversatz (mm) | Einfallswinkel (°) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0.0292 | 0.06 |
| 10 | 0.0589 | 0.11 |
| 15 | 0.0896 | 0.17 |
| 20 | 0.1220 | 0.23 |
| 25 | 0.1565 | 0.30 |
| 30 | 0.1938 | 0.37 |
| 35 | 0.2346 | 0.45 |
| 40 | 0.2795 | 0.53 |
| 45 | 0.3291 | 0.63 |
| 50 | 0.3842 | 0.73 |

Tabelle 4.1 Einfallswinkel als Funktion der Winkelstellung der Glasplatte (6)

Im Messaufbau wurde eine 1 mm dicke Platte eingebaut, deren Winkelstellung sich in einem Bereich von $\omega=0-50^\circ$ einstellen lässt. Jeder Glasplattenstellung entspricht dabei ein bestimmter Einfallswinkel, wie es in Tabelle 4.1 angegeben ist.

Zur Errechnung von CCD-Kameraposition und von den Objektivparametern muss zuerst die gewünschte Vergrößerung festgestellt werden. Mit 60 mm Schirmausdehnung und mit der 8 mm Sensorgröße (1/2") ergibt sich sie zu $b = u'/u = 8/60 = 0,13\bar{3}$. Der Objektabstand muss gleichzeitig mindestens $s=50$ mm betragen, damit die Kamera die Detektierung des Specklemusters nicht stört (das Streufeld nicht abbildet). Die erwünschte Brennweite des Objektivs dann:

$$f = \frac{s}{\left(\frac{1}{b} + 1\right)} = 5,88 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Im Messaufbau wurde ein Weitwinkel-Zoomobjektiv F1.4/3.5-8 mm verwendet, mit dem der notwendigen Sehinkel und die scharfe Abbildung sich nach Befestigung der Kamera einstellen ließen. Wesentlich ist noch die Größe der auf die CCD-Sensorebene abgebildeten Specklekörner. Der durch das Objektiv produzierte mittlere Specklekorndurchmesser muss offensichtlich das Mehrfache eines einzigen CCD-Pixels betragen. Die in Verteilungen 4.3 befindlichen typischen Korngrößen können aus den Koordinate-Grauwert Diagrammen abgelesen werden: in Kenntnis der Schirmabmessung betragen sie näherungsweise $u_1=5$ mm und $u_2=0.6$ mm. Die abgebildeten Speckledurchmesser berechnen sich dann mit der gewählten Brennweite $f=5.88$ mm zu:

$$u'_1 = \frac{1}{\left(\frac{s}{f} - 1\right)} u_1 = 0.66 \text{ mm} \quad \text{und} \quad u'_2 = \frac{1}{\left(\frac{s}{f} - 1\right)} u_2 = 0.079 \text{ mm} \quad (4.3) \quad (4.4)$$

Die Pixelgröße des Sensors von verwendeter Kamera Watec 902B beträgt $10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}$, damit decken bereits die Specklekörner des Hochfrequenz-Störsignals 7-8 Pixel ab.

Die Steuereinheit des Kreutztisches ist eine Schrittmotor-Steuerung Typ MAC 5000 mit drei Kanälen, die mit dem Messrechner durch die serielle Schnittstelle anhand eines vordefinierten Codensystems (Funktionen) kommuniziert. Der Rechner nimmt die Verteilungsbilder mit einer an PCI-Port angeschlossenen Frame-Grabber Karte Solelectron DFW auf. Die Kamerasteuerung und der Bildeinzug sind ebenfalls durch eine mitgelieferte Funktionsbibliothek möglich.

4.3. Optimierung des Filterprozesses

Im Kapitel 4.1. wurde es bereits erwähnt, dass ein Filterprozess zur Auswertung der von steilen Seitenwänden erhaltenen Specklemuster entwickelt werden musste, der die eventuellen, von horizontalen Flächen gestreuten Störungen eliminiert. Anforderungen waren dagegen die möglichst scharfe Trennung von Frequenzbereichen, die schnelle Funktion (zur Vermessung einer Seitenwand sind oft 50-100 Aufnahmen notwendig), möglichst wenige Nebeneffekte. Obwohl die Konvolutionsfilter in der Bildverarbeitung weit verbreitet sind, relativ einfache und schnelle Funktion aufweisen, kommt wegen der Maskierung jeweils ein Informationsverlust vor, der die Messgenauigkeit reduzieren kann. Eine exakte Lösung wird allerdings durch eine Frequenzraum-Filterung mit einer zur Anwendung angepassten Filtercharakteristik angeboten.

Die Optimierung des Filterprozesses umfasst damit die Bestimmung der für die einzelne Reflexionen typischen Ortsfrequenz-Bereiche, die Berechnung der Schnittfrequenzen sowie den Auswahl von optimaler Filtercharakteristik (Gauß, exponentiell, Butterworth).

Als Ausgangspunkt betrachten wir wieder reale Intensitätsverteilungen. Die folgenden drei Abbildungen stellen Ausschnitten solcher Specklefelder dar, die von der Seitenwand einer Werkzeugstruktur mit der obig beschriebenen Messanordnung aufgenommen wurden. Die linke Verteilung zeigt die originale Aufnahme, die Mittlere repräsentiert nur das von der Seitenwand reflektierte Streufeld, während die Rechte nur die sekundäre Störreflexion zeigt (die Letzteren wurden mit Abblenden der uninteressanten Reflexionen aufgenommen).

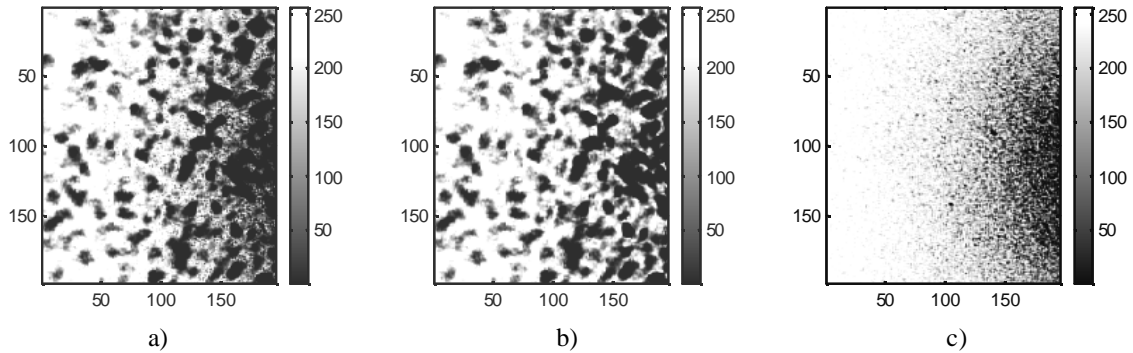


Abbildung 4.10 a) Das detektierte Specklemuster b) Specklemuster aus Reflexion an der Seitenwand c) Specklemuster aus der sekundären Störreflexion

Zweidimensionale Verteilungen können mit Hilfe der 2D Fourier-Transformation in den Frequenzbereich umgesetzt werden. Dies lässt sich aus der Beziehung für kontinuierliche Funktionen mit der folgenden Formel für diskreten, zweidimensionalen Fall angeben:

$$F(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} f(i, j) e^{-2\pi i (i\mathbf{n}_i + j\mathbf{n}_j)} di dj \approx \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} f(i, j) \cdot e^{-2\pi i \left(\frac{i\mathbf{n}_i}{N} + \frac{j\mathbf{n}_j}{M} \right)} \Delta i \Delta j \quad (4.5)$$

worin die Variablen der neuen Funktionen v_i und v_j auf die Integrationslänge bezogenen Ortsfrequenzen sind. Die folgenden Diagramme stellen die mit FFT-Shift zentralisierten, zweidimensionalen Frequenz-Spektren der beiden rechten Verteilungen dar, wobei die größeren Werte als 10^5 zwecks der Sichtbarkeit abgeschnitten wurden (dies verursacht

Veränderungen allerdings nur im zentralen Bereich, wo die relativ großen Erhöhungen durch den bei jeder Aufnahme identischen Bildausschnitt hervorgerufen werden). Die angezeichneten Zonen stellen solche typischen Frequenzbereiche dar, die im anderen Spektrum nicht zu finden sind.

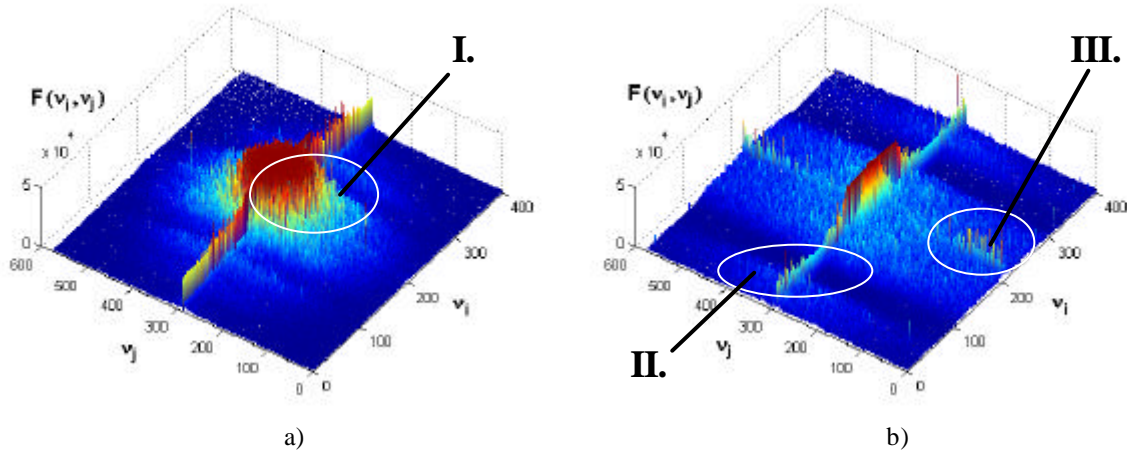


Abbildung 4.11 Fourier-Spektren der Speckleverteilungen von Abbildungen a) 4.10/b und b) 4.10/c

Das linke Diagramm zeigt das Frequenz-Spektrum des von Seitenwand reflektierten primären Specklemusters. Den kleinen Ortsfrequenzen entsprechend sind im zentralen Bereich I. und entlang der Koordinate $v_j=288$ erhebliche Erhöhungen zu entdecken. Im rechten Diagramm dagegen, das den Fourier-Bereich der sekundären Störkomponenten darstellt, fehlen diese Niederfrequenz-Komponenten. Am Spektrumrand befinden sich aber in jeder Richtung eindeutige Verstärkungen (II. und III. sowie die dazu symmetrischen Bereiche). Wesentlich ist ferner, dass die längliche Verstärkung, die sich in Mitte des v_j -Bereiches durchzieht, auch in diesem Fall detektierbar ist.

Ziel ist es dabei eine Tiefpass-Filtercharakteristik zu konstruieren, die die Niederfrequenz-Komponenten des Bereiches I. durchlässt, während die Hochfrequenz-Bereiche II. und III. ausgeschnitten werden. Dafür wird ein Kreis um den Bereich I. genommen, die Werte außerhalb des Kreises werden zu Null gesetzt und das Spektrum wird anschließend zurücktransformiert. Um die optimale Schnittfrequenz (der Kreisradius) zu bestimmen, müssen zuerst die Frequenzbereiche beider Reflexionsarten berechnet werden.

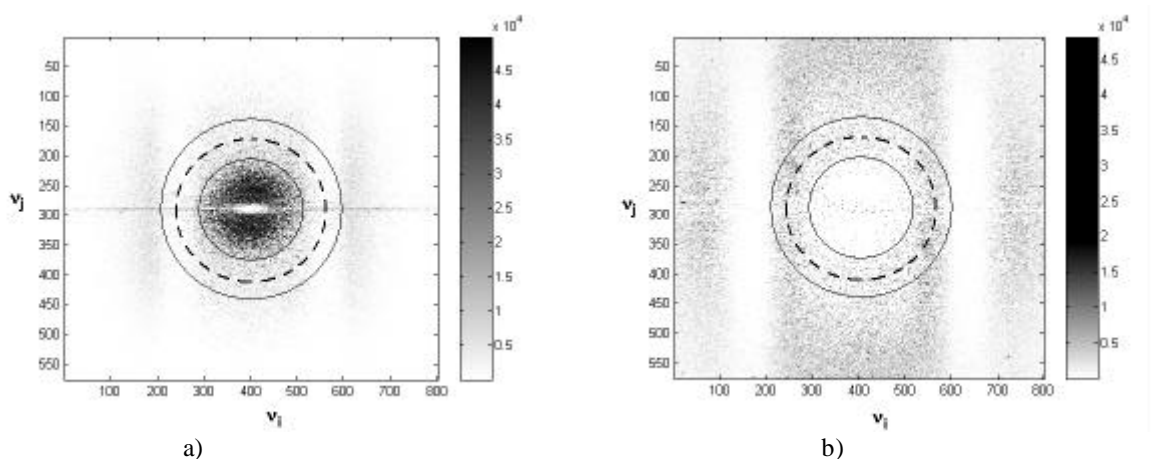


Abbildung 4.12 Fourier-Spektren der Speckleverteilungen von Abbildungen a) 4.10/b und b) 4.10/c (durch Differenzbildung mit dem Originalspektrum wurden die starken zentralen Erhöhungen eliminiert)

Der linke Fourier-Bereich in Abbildung 4.12 enthält nur für die primäre, und der Rechte nur für die sekundäre Reflexion charakteristischen Frequenzen. Das Radius des angezeichneten Kreises stellt die Schnittfrequenz dar: $v_{Si}=v_{Sj}=160$ N/Pixel. Man muss auch der unscharfen Trennung Aufmerksamkeit schenken, mit der die nachteiligen Intensitätsschwingungen nach der Rücktransformation vermieden werden können. Eine genaue Frequenztrennung, die gleichzeitig keine Nebeneffekte auslöst, lässt sich mit dem Butterworth-Filter realisieren: seine Schnittfrequenz ist präzise einstellbar, die Charakteristik weist jedoch unscharfe Kantenübergänge auf. Im zweidimensionalen Fall kann er mit der Formel

$$H_1(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j) = \frac{1}{1 + \left(\frac{R(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j)}{R_0} \right)^{2n}} \quad (4.6)$$

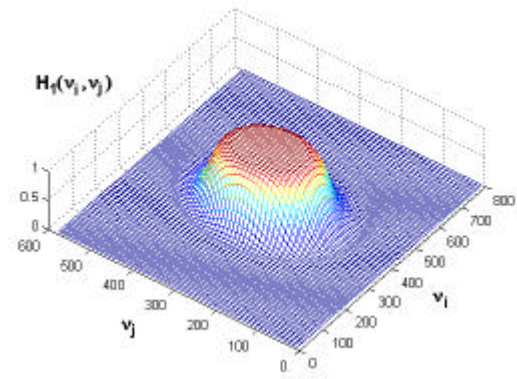


Abbildung 4.13 Charakteristik des zylindrischen Tiefpass-Filters

angegeben werden, worin R_0 die Schnittfrequenz, $R(v_i, v_j)$ den Abstand $\sqrt{\mathbf{n}_i^2 + \mathbf{n}_j^2}$ eines Pixels (v_i, v_j) vom Verteilungsmittelpunkt und n die Ordnung des Butterworth-Filters kennzeichnen. Abbildung 4.13 stellt die Charakteristik des geplanten 2D Butterworth-Filters für eine Schnittfrequenz von 160 N/Pixel und $n=5$ Ordnung dar.

Ein weiterer fraglicher Punkt ist, welche Verteilungskomponente die Linien-Erhöhung entlang der Koordinate $v_j=288$ repräsentiert. Sie muss allerdings in jeder Verteilung der Abbildung 4.10 erscheinen, eine sehr niedrige Ortsfrequenz besitzen und eine Periodizität in i -Richtung repräsentieren (weil sie zur Koordinate v_j senkrecht liegt). Die gesuchte Komponente ist ein asymmetrisches Intensitätsprofil (in Diagrammen 4.4: steigende Intensität der Koordinate i entlang), das praktisch aus der schrägen Ausleuchtung der Mattscheibe stammt. Die detektierten Specklemuster sind auf diese gleichmäßige Intensitätssteigung überlagert. Die Beseitigung derartiger Niederfrequenz-Bestandteile reduziert einigermaßen die Asymmetrie der Verteilungen und hilft nach empirischen Untersuchungen bei der Auswertung. Der Ausschnitt der Linie $v_j=288$ soll möglichst schmal sein (um das Wenigste von Messsignal-Speckle zu entfernen) sowie einen allmählichen Kantenübergang besitzen. Abbildung 4.14 zeigt den länglichen Hochpass-Filter mit Butterworth-Kantenübergängen; seine Schnittfrequenz beträgt 5 N/Pixel, Ordnung $n=5$.

$$H_2(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j) = \frac{1}{1 + (\sqrt{2} - 1) \left(\frac{L_0}{L(\mathbf{n}_j)} \right)^{2n}} \quad (4.7)$$

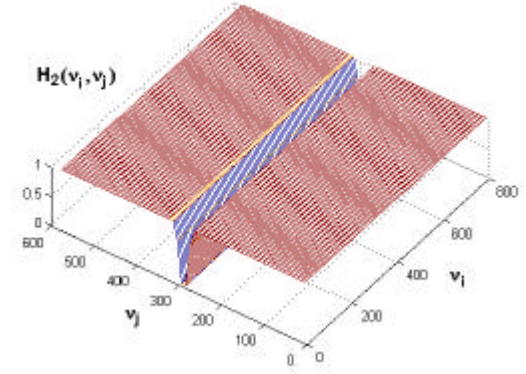


Abbildung 4.14 Charakteristik des Linien-Hochpass-Filters

worin L_0 die Schnittfrequenz des Hochpass-Filters und $L(v_i)$ den Abstand des Pixels (v_i, v_j) von der $v_j=288$ Mittellinie des Spektrums kennzeichnet. Der angewendete Filter besteht schließlich aus den Charakteristiken des H_1 Tiefpass- und des H_2 Hochpass-Filters als $H(v_i, v_j) = H_1(v_i, v_j) * H_2(v_i, v_j)$. Dies stellt die Abbildung 4.15 samt dem $G(v_i, v_j)$ geschnittenen Spektrum dar.

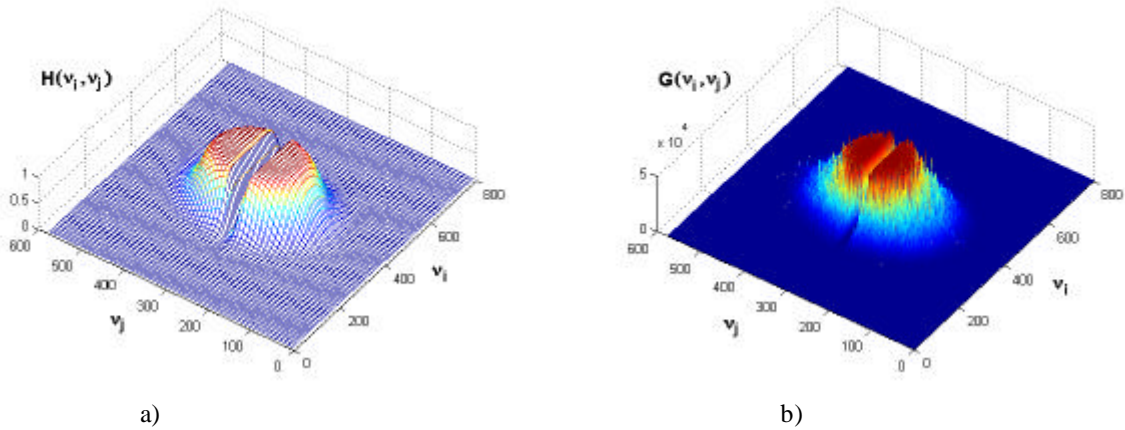


Abbildung 4.15 a) Charakteristik des entwickelten Bandpass-Filters b) Das geschnittene Ortsfrequenzspektrum des Originalbildes

Der gefilterte Spektrumbereich berechnet sich zu:

$$G(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j) = F(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j) * H_1(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j) * H_2(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j) \quad (4.8)$$

Das störungsfreie Speckfeld ergibt sich durch die diskrete Fourier-Rücktransformation:

$$g(i, j) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} G(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j) e^{2\pi i (i n_i + j n_j)} d\mathbf{n}_i d\mathbf{n}_j \approx \frac{1}{MN} \sum_{n_i=0}^{N-1} \sum_{n_j=0}^{M-1} G(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j) \cdot e^{2\pi i \left(\frac{i n_i}{N} + \frac{j n_j}{M} \right)} \Delta n_i \Delta n_j \quad (4.9)$$

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen die originale, ungefilterte sowie die gefilterte, störungsfreie Intensitätsverteilungen eines Speckfeldes. Es ist gut zu erkennen, dass die mittlere Intensität im rechten Bild wegen dem Hochpass-Filter innerhalb des Specklemusters gleichmäßiger verteilt ist (Diagrammen 4.16).

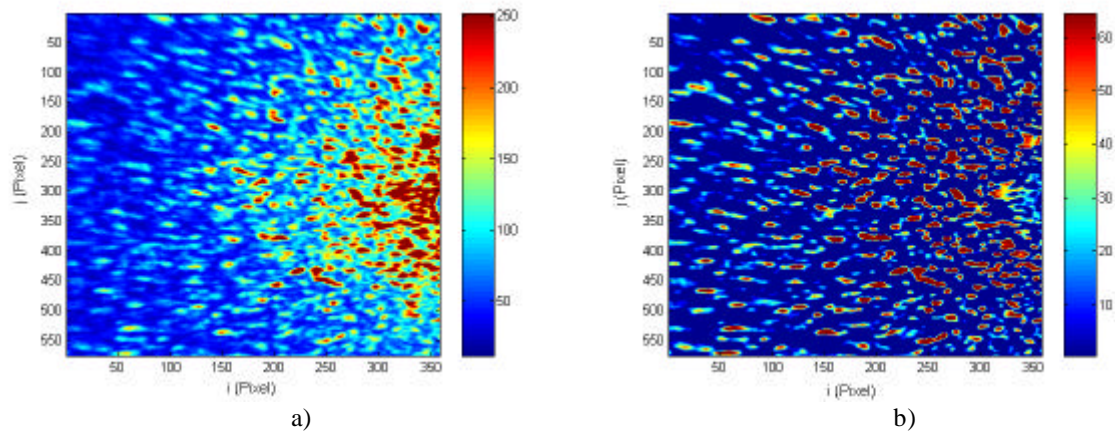


Abbildung 4.16 a) Die ungefilterte Verteilung b) Das Specklefeld nach der Filterung und Rücktransformation

Obwohl die starke Speckle-Reflexion der originalen Verteilung in dem gefilterten Bild (auf der rechten Seite, bei hohen i Koordinaten) reduziert wurde, wurden die Niederfrequenz-Specklekörner "hervorgehoben", damit ist jede Veränderung in der Specklestruktur einfacher zu detektieren. Die Intensitätsabläufe sind in Diagrammen 4.17/a und 4.17/b dargestellt. Die in zurücktransformierten Bilder auftretenden negativen Grauwerte sind hinsichts der Auswertung indifferent, wünschen keine Korrektur.

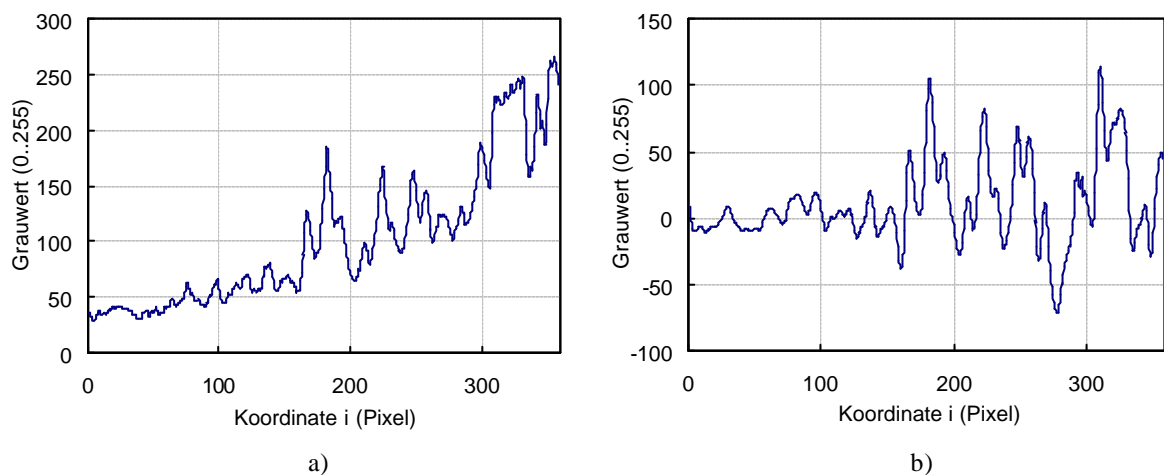


Abbildung 4.17 Intensitätsprofile der Specklemuster von Abbildungen a) 4.16/a und b) 4.16/b

Zusammenfassend besteht der anzuwendende Filter aus der Kombination eines zirkularen Butterworth Tiefpass-Filters (Schnittfrequenz 160 N/Pixel, Ordnung 5) und eines ebenfalls mit Butterworth-Kantenübergängen realisierten Linien-Hochpass-Filters (Schnittfrequenz 5 N/Pixel, Ordnung 5).

4.4. Software-Applikation für die Steuerung und Auswertung

Bei den ersten experimentellen Vermessungen wurden die Specklebilder manuell, mit einer für die Kamera mitgelieferten Software aufgenommen und die Auswertung mit der Programmiersprache MATLAB durchgeführt. Zur Vereinfachung der Messungen und schnellen Auswertung wurde eine Messsoftware für die realisierte Anordnung ausgearbeitet. Die Software-Entwicklung war auch dadurch motiviert, dass bei einer Speckle-Vermessung oft mehrere zehn oder hundert Verteilungen aufzunehmen und auszuwerten sind, was ohne eine angepasste Software-Anwendung sehr zeitaufwendig wäre.

Die Software wurde für Betriebssysteme Windows NT/2000 in Umgebung Borland Delphi entwickelt. Ein wichtiger Aspekt war die benutzerfreundliche Funktionsweise, wodurch die Bedienung des Messsystems erleichtert wird. Die realisierten Funktionen waren wie folgt:

1. Steuerung des Kreuztisches
2. Steuerung der Kamera
3. Auswertung
 - Filterung
 - Statistische-, Kontrast- und Korrelationsberechnungen
 - Regressionsberechnungen
4. Weitere Funktionen: Speichern, Öffnen, Drucken von Dateien etc..

Die Abbildung 4.18 zeigt das Hauptfenster des Programms.

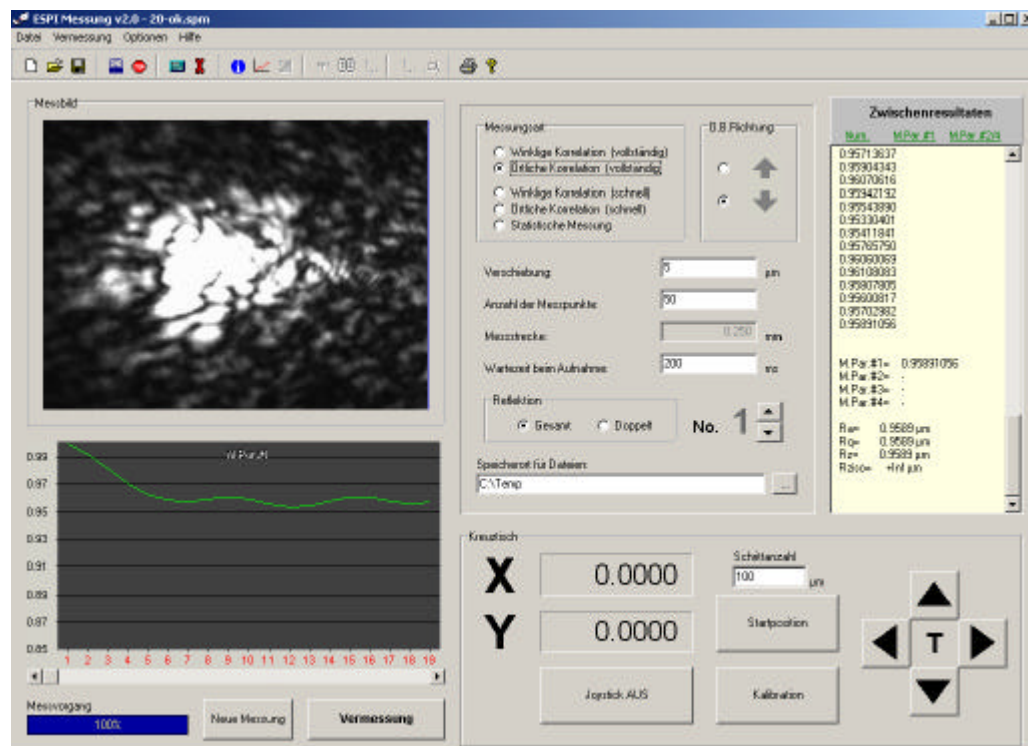


Abbildung 4.18 Hauptfenster der Messsoftware

Wichtigere Teile des Hauptfensters sind das echtzeitfähige Kamerabild, die graphische und textartige Darstellung von Messergebnissen (Echtzeit-Diagramm und Textfeld), Schalter und

Textfelder zur Einstellung von Messparametern sowie das Fenster in der rechten unteren Ecke für die Kreuztisch-Steuerung.

Zu den Softwareoptionen gehört die Einstellbarkeit des Geschwindigkeitsprofils vom Kreuztisch: Verfahrensgeschwindigkeit, Beschleunigung beim Ablaufen und vor dem Positionserreichen (Abbildung 4.19). Außerhalb des Messprozesses kann man die Prüflinge auch manuell mit den Pfeilen im Tischsteuerfenster oder mit dem zum Messaufbau gehörigen Joystick positionieren.

Unter den Kameraeinstellungen sind vorrangig die Steuerbarkeit der Integrationszeit und der Gamma-Korrektion. Diese Parameter wurden zusammen mit den Kreuztischeinstellungen vor der Kalibrierung auf Optimalwert gesetzt und während der Messungen konstant gehalten. Sowohl die Positionierungs- als auch die Kameraparameter sind im Menüpunkt "Einstellungen" zu verändern, die dazugehörigen Programmfenster sind in Abbildung 4.19 dargestellt.



Abbildung 4.19 Einstellungsfenster der Messsoftware

Vor dem Beginn einer Vermessung sind die Messart (Statistik, Kreuz-/Auto-Korrelation), die dazugehörigen Parameter (Aufnahmenanzahl, Probenverschiebung, Winkelveränderung) sowie die Bewegungsrichtung des Tisches anzugeben. Ebenfalls ist vorher einzustellen, welche Messgrößen bei der Auswertung berechnet und damit für die Regression berücksichtigt werden sollen. Die Voreinstellungen und die messbaren Parameter sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Die Messsoftware bietet für die Kreuz-Korrelationsmessungen zwei Möglichkeiten an: Bestimmung der vollständigen Korrelationskurve in einem Oberflächenpunkt oder die sog. schnelle Korrelationsmessung.

Bei der Letzteren werden in jedem Oberflächenpunkt nur zwei Verteilungen mit optimaler Winkeländerung oder Probenverschiebung aufgenommen und daraus ein optischer Rauigkeitsparameter berechnet. Anschließend werden die in mehreren Punkten berechneten Parameter gemittelt (die Erstere ist bei der Kalibrierung, die Letztere ist für praktische Vermessungen vorteilhaft). Ihre Bedeutungen werden im nächsten Kapitel detailliert erklärt.

Schließlich ist anzugeben, ob das aufgefangene Specklemuster, vom Neigungswinkel der Seitenwand abhängig, sekundär gestreute Störungen enthält. Im letzteren Fall wird der optimierte Filterprozess bei jeder Aufnahme durchgeführt und die optischen Parameter werden aus den gefilterten Verteilungen berechnet. Zur Erzeugung des Frequenzspektrums sowie zur Rücktransformation des geschnittenen Spektrumbereichs wendet die Software eine zweidimensionale schnelle Fourier-Transformation (FFT) an, damit die Gesamtmesszeit

wesentlich reduziert wird. Die Schnittfrequenzen und die Ordnungen der Tief- und Hochpass-Filter lassen sich im Menüpunkt "Einstellungen" verändern.

| | Einstellungen | Messbare Parameter |
|-----------------------------|--|---|
| Statistische Messung | Probenverschiebung Anzahl der Messpunkte Bewegungsrichtung des Tisches Wartezeit zwischen den Aufnahmen | Gesamtintensität Streuung des Intensitätsablaufes Kontrast (Formel (3.3)) Verteilungsdifferenzen |
| Ortskorrelation | Probenverschiebung Anzahl der Messpunkte Bewegungsrichtung des Tisches Wartezeit zwischen den Aufnahmen | Kreuz-Korrelationskoeff. (Formel (3.5)) Annäherung vom Kreuz-Korrelationskoeff. |
| Angulare Korrelation | Anzahl der Winkeländerungen Anzahl der Messpunkte Wartezeit zwischen den Aufnahmen | Kreuz-Korrelationskoeff. (Formel (3.5)) Annäherung vom Kreuz-Korrelationskoeff. |
| Auto-Korrelation | Anzahl der Messpunkte Wartezeit zwischen den Aufnahmen | Auto-Korrelationskoeff. (Formel (3.8)) |

Tabelle 4.2 Funktionen der Messsoftware

Nach Beginn der Vermessung wird die Probenpositionierung, der Verteilungseinzug und die Berechnung der optischen Messparameter automatisch durchgeführt. Die Bestimmung der realen Rauheitsmessgrößen geschieht mit polynomischer Regression anhand der Kalibrierungsergebnisse. Die Regressionskoeffizienten und die Ordnung des Regressionspolynoms können unter dem Menüpunkt "Kalibrierung" eingestellt werden. Die Regressionskonstanten lassen sich in einer speziellen Dateiform speichern, damit mehrere Kalibrierungen gleichzeitig benutzbar sind (z.B. für unterschiedliche Materialien).

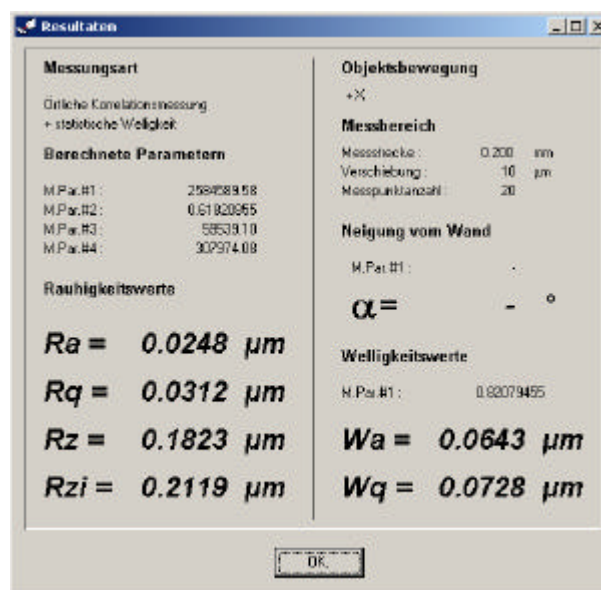


Abbildung 4.20 Anzeige von Resultaten im Ergebnisfenster

Am Ende der Vermessung erhält man die gemessenen optischen Parameter und die wesentlicheren Rauigkeitswerte R_a , R_q , $R_{z\text{din}}$ und $R_{z\text{iso}}$ in einem Ergebnisfenster (Abbildung 4.20).

Die Software ermöglicht die Abspeicherung von gesamten Messreihen, die Öffnung von früheren Ergebnissen sowie die Erzeugung von Protokollausdrucken. Die Resultate werden zusammen mit den Messeinstellungen in ".spm"-Dateien gespeichert.

Kapitel 5.

Experimente und ihre Auswertung

Die Erzeugungsmethode der zur Kalibrierung verwendeten Referenzmuster und ihre Eigenschaften werden vorgestellt. Nach den Vorversuchen werden die optimalen statistischen Parameter zielorientiert ausgewählt. Unter Anwendung dieser Ergebnisse wird eine neuartige Korrelationsmethode vorgeschlagen. Versuche werden mit dem kalibrierten Messsystem durchgeführt und deren Ergebnisse werden bewertet. Die Anwendbarkeitsgrenzen der einzelnen Methoden werden betrachtet.

5.1. Erzeugung einer Referenzreihe zur Kalibrierung

Bei Kalibrierung der Messanordnung lag eine weitere Erschwernis darin, dass weder Referenzproben noch die Möglichkeit für eine Referenzmessung zur Verfügung standen. Obwohl einige mit unterschiedlichen technologischen Parametern hergestellten Strukturen vorhanden waren, waren ihre lateralen Rauigkeiten unbekannt. Es wurden Versuche durchgeführt, um diese durch Abschneiden der fertigen Grabenstrukturen auszumessen. Erschwernis wäre in diesem Fall, dass die erzeugbaren Rauigkeiten nur einen schmalen, für die gegebene Technologie typischen Bereich umfassen und die kalibrierungsgünstigen, stufenweise verteilten R_a , R_q Werte nicht hergestellt werden könnten (weil der Zusammenhang zwischen den technologischen Parametern und der Seitenwandrauigkeit unbekannt und kompliziert ist).

Es war daher notwendig, eine "seitenwandartige" Referenzreihe aus mindestens 10-15 Proben zu erzeugen, wobei die Rauigkeiten der vertikalen Flächen in dem für Replikationswerkzeuge typischen Rauigkeitsbereich möglichst in äquidistanten Schritten verteilt sind. Dafür wurden im ersten Schritt Siliziumstrukturen mit chemischem Nassätzen erzeugt, deren waagerechte Oberflächen unterschiedliche Rauigkeiten aufweisen. In einseitig polierte {100} Wafer wurden dabei jeweils dieselben Strukturen neben unterschiedlichen technologischen Parametern abgeätzt. Die verwendete KOH-Konzentration (20,30 und 40 %), die Ätztemperatur (70,75..95 Grad) und die Ätzzeit übten Einfluss auf die Beschaffenheit der gebildeten Oberflächen. Insgesamt wurden 35 Wafer erstellt, von denen wegen der aufgetretenen Anisotropie, inhomogener Flächen und größerer Oberflächenfehler nur ein Teil weiter verwendbar war. Letztlich standen 20 Muster zur Verfügung, deren Rauigkeiten zwischen den Grenzen von $R_a=0.02-0.23 \mu\text{m}$ relativ gleichmäßig verteilt waren. Aus den Testwafern wurden schmale Bänder (0.5 mm) ausgeschnitten und auf vorbereitete Aluminium-Plättchen mit einer Größe von 15x15x2 mm geklebt (Abbildung 5.1).

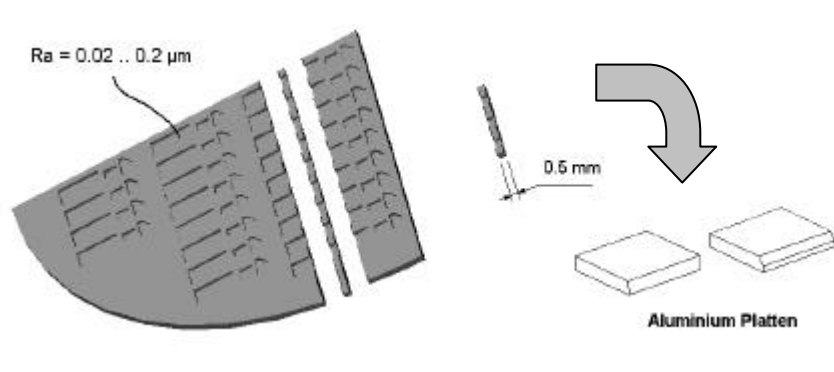


Abbildung 5.1 Erzeugung der Referenzproben

Die Plättchen wurden mit zwei Seitenwandneigungen $\alpha=90^\circ$ und 55° angefertigt, wodurch beide grundsätzlichen Streumodi sich simulieren ließen. Somit bestand die Referenzreihe aus $2 \times 20 = 40$ Proben. Als Referenzwerte wurden die Messergebnisse mit einem Taylor Hobson PGI Plus Profilometer (induktive Auswertung) angenommen. Die Rauigkeitswerte der Proben sind in Tabelle 5.1 dargestellt, alle Parameter sind in μm angegeben (S_m ist ein horizontaler Rauigkeitsparameter, steht für den mittleren Abstand der Profilabweichungen).

| Nr | R_a | R_q | R_{\max} | $R_{z\text{din}}$ | $R_{z\text{iso}}$ | S_m | Nr | R_a | R_q | R_{\max} | $R_{z\text{din}}$ | $R_{z\text{iso}}$ | S_m |
|----|-------|-------|------------|-------------------|-------------------|-------|----|-------|-------|------------|-------------------|-------------------|-------|
| 1 | 0.02 | 0.025 | 0.138 | 0.124 | 0.542 | 0.018 | 11 | 0.114 | 0.142 | 0.784 | 0.720 | 0.738 | 0.013 |
| 2 | 0.021 | 0.029 | 0.244 | 0.171 | 0.5615 | 0.018 | 12 | 0.119 | 0.151 | 0.846 | 0.718 | 0.75 | 0.014 |
| 3 | 0.021 | 0.03 | 0.392 | 0.2 | 0.581 | 0.019 | 13 | 0.132 | 0.18 | 1.95 | 1.02 | 1.07 | 0.015 |
| 4 | 0.022 | 0.03 | 0.274 | 0.224 | 0.6005 | 0.016 | 14 | 0.141 | 0.177 | 1.13 | 0.972 | 0.993 | 0.02 |
| 5 | 0.049 | 0.065 | 0.57 | 0.414 | 0.62 | 0.016 | 15 | 0.159 | 0.207 | 1.41 | 1.01 | 1.02 | 0.015 |
| 6 | 0.055 | 0.133 | 1.96 | 0.675 | 0.6395 | 0.019 | 16 | 0.163 | 0.209 | 1.28 | 1.1 | 1.17 | 0.03 |
| 7 | 0.072 | 0.103 | 1.37 | 0.708 | 0.742 | 0.02 | 17 | 0.168 | 0.214 | 1.27 | 1.14 | 1.22 | 0.016 |
| 8 | 0.078 | 0.098 | 0.573 | 0.526 | 0.544 | 0.014 | 18 | 0.177 | 0.225 | 1.42 | 1.15 | 1.21 | 0.018 |
| 9 | 0.103 | 0.129 | 0.792 | 0.685 | 0.718 | 0.016 | 19 | 0.183 | 0.228 | 1.31 | 1.21 | 1.28 | 0.02 |
| 10 | 0.109 | 0.139 | 0.847 | 0.7 | 0.749 | 0.014 | 20 | 0.238 | 0.3 | 1.67 | 1.46 | 1.56 | 0.022 |

Tabelle 5.1 Rauigkeitswerte der Referenzproben

Bei den Plättchen mit 55° Seitenwandneigung hatte die Formabweichung der Referenzproben von Werkzeugstrukturen keinen Einfluß auf die experimentellen Untersuchungen. Wird das Laserbündel auf die Fläche des aufgeklebten Siliziumbandes fokussiert, so projiziert sich das gesamte Specklefeld - ähnlich wie bei Werkzeugstrukturen - auf die Mattscheibe. Bei Proben mit senkrechten Seitenwänden musste aber die von umliegenden Flächen gestreute Störung gesichert werden. Diese wurden daher jeweils auf einen polierten Wafer gelegt und das Bündel wurde an das untere Drittel der Seitenfläche fokussiert (Abbildung 5.2).

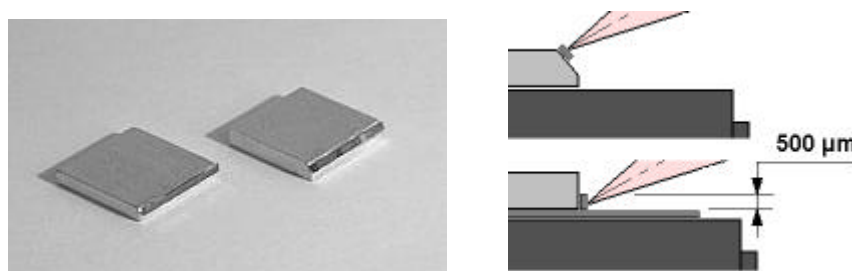


Abbildung 5.2 Referenzproben

5.2. Statistische Verfahren

Hierbei werden die für Softwareoption "Statistische Vermessungen" definierten Messgrößen sowohl für Gesamt- als auch für teilweise Reflexionen bestimmt (siehe Tabelle 4.2). Die Untersuchung umfasste nicht nur die Berechnung des Speckle-Kontrastes, sondern im breiteren Sinne alle solche statistischen Eigenschaften erster Ordnung, die mit der Rauigkeit in Verknüpfung gebracht werden können. Als optimale statistische Parameter wurden dabei vier Messgrößen herangezogen wie Mittelintensität, Kontrast, Streuung von Mittelintensitäten und die integrierte Differenz der Speckleverteilungen (Formeln (5.1)-(5.4)).

Die Verwendung dieser Kenngrößen ergab sich als Ergebnis einer vorläufigen Untersuchung, wobei alle rauigkeitsabhängigen Parameter erster Ordnung systematisch analysiert wurden. Die untersuchten Messgrößen waren einerseits die Intensität (G_1), die 2D-Standardabweichung (G_2), der 2D-Kontrast (G_3). Andererseits wurden solche Größen eingeführt, die auf die Abweichungen der in unterschiedlichen Objektpunkten erfassten Specklemuster hinweisen und nach Erfahrungen die Rauigkeit ebenfalls bewerten: absolute Abweichung der Mittelintensität (G_4) und Subtraktion der Verteilungsbilder (G_5) (für Formeln $G_{1..5}$ siehe Anhang I). Da diese Werte immer innerhalb einer Bezugsstrecke, in mehreren Oberflächenpunkten bestimmt werden, es lässt sich dabei für jede Kenngröße ein Mittelwert und eine Streuung berechnen.

Daraus ergaben sich die im Anhang I befindlichen "Diagramm-Matrizen", wodurch die die Rauigkeit am besten beschreibenden Eigenschaften ausgewählt werden konnten. Diese Messparameter sind mathematisch ausgedrückt wie folgt:

$$P_1 = \overline{\langle I \rangle} = \frac{1}{L} \sum_{Y=1}^L \langle I_Y \rangle \quad P_2 = \overline{K} = \frac{1}{L} \sum_{Y=1}^L K_Y \quad (5.1) \quad (5.2)$$

wobei i und j die Bildkoordinaten sind und

$$P_3 = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{Y=1}^L (\overline{\langle I \rangle} - \langle I_Y \rangle)^2} \quad P_4 = \overline{(I_Y - I_{Y-1})} = \frac{1}{L} \sum_{Y=1}^L (I_Y - I_{Y-1}) \quad (5.3) \quad (5.4)$$

worin I_Y die in $Y=1..L$ -ter Objektposition aufgenommene Verteilung kennzeichnet. Die Rauigkeitsabhängigkeiten von Intensität (P_1) und Kontrast (P_2) sind eindeutig anhand der theoretischen Ableitung im Kapitel 3. Zum Parameter 1. ist es zu bemerken, dass er sich auf die summierte Intensität der am Schirm erscheinenden Verteilung bezieht, da die Bildgrößen (M und N) konstant sind. Dadurch steht er mit dem im Kapitel 4.1. erwähnten Verhältnis von spekularen/gestreuten Lichtkomponenten im Zusammenhang.

Der dritte Parameter gibt die Streuung der in mehreren Punkten berechneten Intensitätswerte (Parameter P_1) an. Dies wird im Diagramm 5.3 dargestellt, wobei von zwei unterschiedlich rauhen Seitenwänden aufgenommene Mittelintensitäten in Abhängigkeit der Probenverschiebung dargestellt sind (mit $\alpha=55^\circ$ Neigungswinkel).

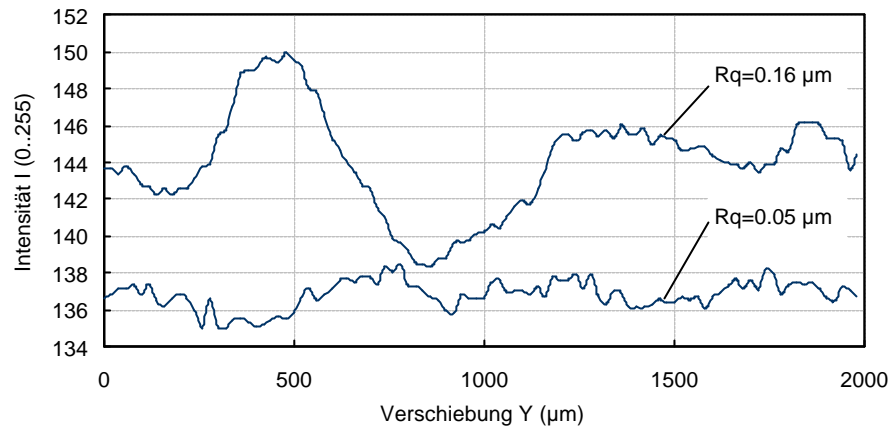


Abbildung 5.3 Intensitätsablauf während einer Probenverschiebung

Im Falle größerer Oberflächenrauigkeit schwanken die gemessenen Mittelintensitäten stärker um einen Durchschnittswert. Da der Parameter P_3 eben diese Schwankung ausdrückt, ist der Zusammenhang eindeutig (zudem ist für rauhere Proben eine höhere Mittelintensität vorhanden).

Schließlich stellt der vierte Messparameter die Summe der pixelweisen Grauwertdifferenzen von Nachbarverteilungen dar. Als Effekt der Probenverschiebung lagern sich die Speckles um, die Struktur der Intensitätsverteilung verändert sich. Der Grad dieser "Umlagerung" wird durch den vierten Parameter ausgedrückt.

Für die ersten Kalibrierungsmessungen wurde auf einer möglichst langen Bezugsstrecke gemessen und möglichst viele Messwerte gemittelt. Dies bedeutete praktisch 500 Messpunkte auf einer Bezugsstrecke von 10 mm, mit 20 µm Verschiebungen senkrecht zur optischen Achse in Richtung Y. Die Vermessungen wurden dreimal wiederholt (zweimal in beiden Richtungen), damit stellt jeder Diagrammpunkt in den folgenden Abbildungen einen Durchschnitt von insgesamt 2000 Messwerten dar.

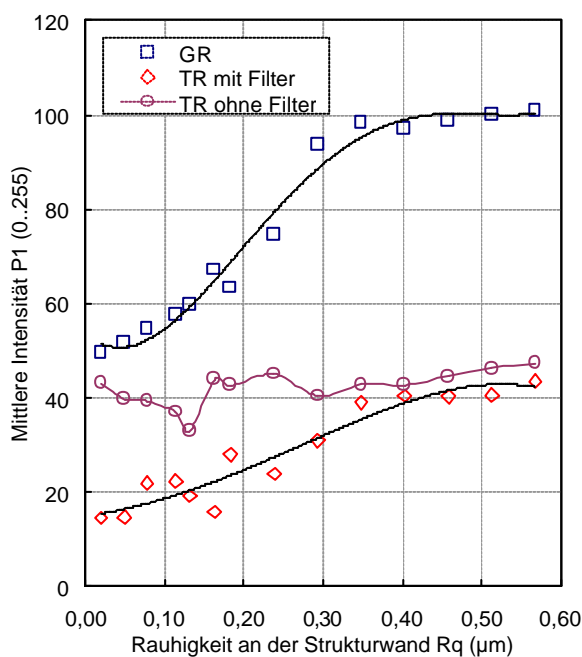


Abbildung 5.4 Mittlere Intensität (P_1)

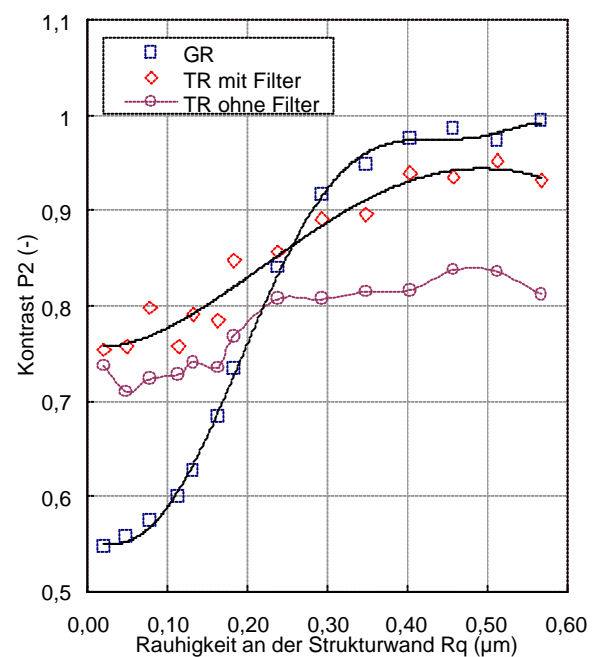


Abbildung 5.5 Speckle-Kontrast (P_2)

Diagramme 5.4 und 5.5 stellen die ersten zwei Parameter in Abhängigkeit der Seitenwandrauhigkeit dar. Zu jedem Messparameter gehören im wesentlichen vier solche Diagramme (je nach Rauheitswerten R_a , R_q , $R_{z\text{din}}$, $R_{z\text{iso}}$), die in der Art ähnlich sind und sich meistens nur durch ihre Steilheiten unterscheiden. Zwecks Anschaulichkeit und Vergleichbarkeit sind die aus Gesamtreflexion (GR) und aus teilweiser Reflexion (TR) berechneten Parameter in einem Diagramm dargestellt.

Im Falle der Gesamtreflexion steigt sowohl die durchschnittliche Intensität als auch der Kontrast mit der Rauigkeit an. Während die Erstere mit der immer zunehmenden Streuintensität verknüpft ist, steht die Letztere mit der immer stärkenden Modulation in der Wellenfront im Zusammenhang. Für beide Fälle ist erkennbar, dass ihre Anwendungsbereiche zwar begrenzt sind, sie können in einem breiteren Intervall von $0 < R_q < 0.2\text{--}0.3 \mu\text{m}$ mit relativ höher Genauigkeit eingesetzt werden (im Vergleich zu literarischen Angaben).

Bei teilweiser Reflexion lassen sich ähnliche Aussagen treffen. Auch die Notwendigkeit der Ausfilterung des sekundären Störsignals ist an den Kurven zu entdecken. Die ohne Filterung berechneten Werte weisen - vor allem bei niedrigen lateralen Rauigkeiten, wo der größte Teil der Einfallintensität in das Innere der Struktur reflektiert wird - kleine Übereinstimmung mit der Rauigkeit auf. Wesentlich ist noch, dass bei niedrigen Rauigkeiten die Ergebnisse eine höhere Streuung zeigen, die Messunsicherheit wächst. Dies kann ebenso auf den vorigen Grund zurückgeführt werden: an der Strukturwand tritt eine starke Spekularreflexion auf und die primäre Streuung stellt sich im Streufeld nicht ein; das Signal-Störung Verhältnis sinkt. Dieses Verhältnis wird durch den Filterprozess leider weiter reduziert (dies ist für den Speckle-Kontrast besonders nachteilig, da den Kontrast eines zurücktransformierten Specklebildes bei kleinen Intensitäten meistens durch den Filterprozess beeinflusst wird).

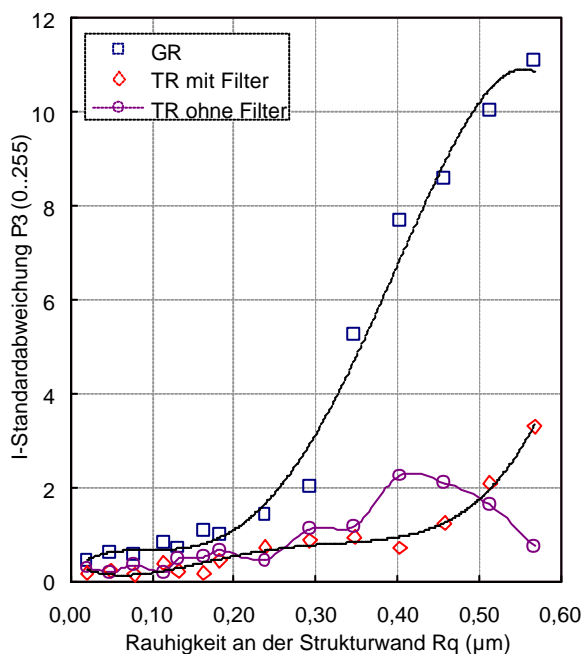


Abbildung 5.6 Standardabweichung der Intensität (P_3)

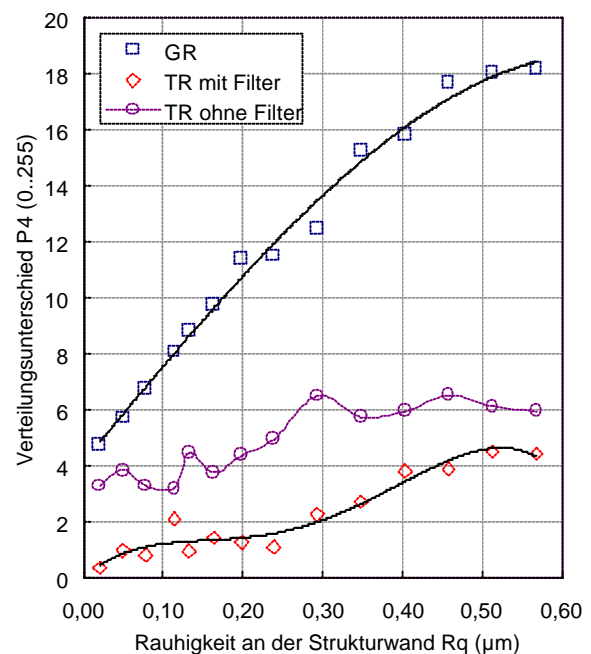


Abbildung 5.7 Verteilungsunterschied (P_4)

Der dritte und der vierte Messparameter sind in den Diagrammen 5.6 und 5.7 als Funktion der Seitenwandrauhigkeit dargestellt. Im Falle der Gesamtreflexion beginnt die Mittelintensitäts-Streuung nur bei größeren Rauigkeiten zu steigen, sie deutet damit auf eine größere Oberflächen-Unebenheit hin. Nach Erfahrungen bietet der dritte Parameter die Möglichkeit zur Bewertung der Welligkeit an (nach Erfahrungen steigt die Kurve weiter an, für eine

Welligkeitsanalyse wären mehr Referenzproben erforderlich). Es wurden Versuche zum Ausnutzen des Effektes vorgenommen und die Messsoftware berechnet bereits die Welligkeit anhand dieses Parameters (siehe Abbildung 4.20), die Beziehung ist aber im vollen Umfang noch ungeklärt. Bei teilweiser Reflexion liefert die Methode kein befriedigendes Ergebnis, für Regressionsberechnung wird daher in diesem Fall der Parameter 3 nicht berücksichtigt.

Der vierte Messparameter bietet dagegen sowohl für Gesamt- als auch für teilweise Reflexionen eine praktische Beziehung an, er kann sogar innerhalb des untersuchten Bereiches durch eine Kurve mit konstanter Steilheit charakterisiert werden. Gegenüber dem vorigen Parameter scheint die Anwendbarkeit unbeschränkt zu sein, zumindest für die interessierenden Rauigkeiten. Anhand der Formel (5.4) ist es einzusehen, dass eine derartige Differenzbildung von Intensitätsstrukturen, ähnlich wie der Korrelationskoeffizient, auf die "Konformität" der Verteilungen hinweist (einige Autoren nutzen diese Formel für Schätzung des Korrelationskoeffizienten [2,46]).

Damit führt das Ergebnis in eine neue Korrelationsrechnung über. Die Probenoberfläche kann durch eine Korrelation, die bei geringer Probenverschiebung auftritt, charakterisiert werden - ähnlicherweise wie bei den angularen und spektralen Korrelationen. Diese "örtliche" Korrelationsrechnung (die bereits tatsächlich ρ_{12} -Koeffizienten berechnet) wurde auch in die Messmethodik eingebaut und wird durch die Messsoftware mit berechnet.

An den gemessenen statistischen Parametern wurden jeweils Regressionskurven gefittet, die in den Diagrammen mit gestrichelten Linien gezeigt sind (Polynome vierter Ordnung).

Zusammenfassend können die klassischen statistischen Messungen - wobei einzelne Verteilungen ausgewertet werden - nur für relativ glatten Oberflächen eingesetzt werden, unter der Rauigkeit von ca. $R_q=0.25\text{ }\mu\text{m}$. Die Differenzbildung der in unterschiedlichen Oberflächenpunkten aufgenommenen Speckebilder führt zu der Ortskorrelationsauswertung, die in einem breiteren Rauigkeitsintervall anwendbar ist.

5.3. Kreuz-Korrelationen

In der Praxis wurden zwei Korrelationsmethoden realisiert: die angular Korrelation und darüber die vorher erwähnte örtliche Korrelation. Bei den theoretischen Berechnungen wurden jeweils feste Winkel- oder Wellenlängenänderung willkürlich angenommen und dafür der Rauigkeits-Korrelationskoeffizient Kennlinien bestimmt. Zur Kalibrierung des Messaufbaus stellen aber diese Werte (bei angularer Korrelation die Winkeländerung $\Delta\varphi$ und bei Ortskorrelation die Probenverschiebung ΔY) solche Größen dar, die hinsichts der Messgenauigkeit eine Optimierung erfordern.

Die Korrelationsmessungen wurden daher bei jeder Probe unter unterschiedlichen Winkeländerungen / Probenverschiebungen vorgenommen. Nach Positionierung der Probe wurde das erste Specklemuster als Referenz aufgenommen. Hiernach wurde der Einfallswinkel oder die Y Probenkoordinate in vordefinierten Schritten verändert und die Korrelation zwischen den erhaltenen Specklefeldern und der Referenzverteilung berechnet. Als Resultat ergab sich damit für jede Rauigkeit eine Winkeländerungs-Korrelationskoeffizient oder eine Probenverschiebungs-Korrelationskoeffizient Kennlinie. Diese Kurven repräsentieren zugleich die zur gegebenen Rauigkeit gehörigen Korrelationsfunktionen, wofür ein Beispiel in Abbildung 5.8/a ersichtlich ist. Die Funktion hat eine typische "spitzenförmige" Art, im Punkt $(\Delta\varphi_X, \Delta\varphi_Y)=0$ oder $(\Delta X, \Delta Y)=0$ besitzt den Maximalwert Eins und nimmt mit Zunahme von $\Delta\varphi_Y$ oder ΔY - abweichend von der Referenzaufnahme - jeweils monoton ab. In der Praxis werden der Einfallswinkel und die Probenposition nur einer Koordinate entlang verändert. Auf Einmal lässt sich nur die Hälfte dieser Trajektorie ausmessen (in einer Richtung vom Ausgangspunkt aus - siehe die markierte Kurvenstrecke in Abbildung 5.8/a).

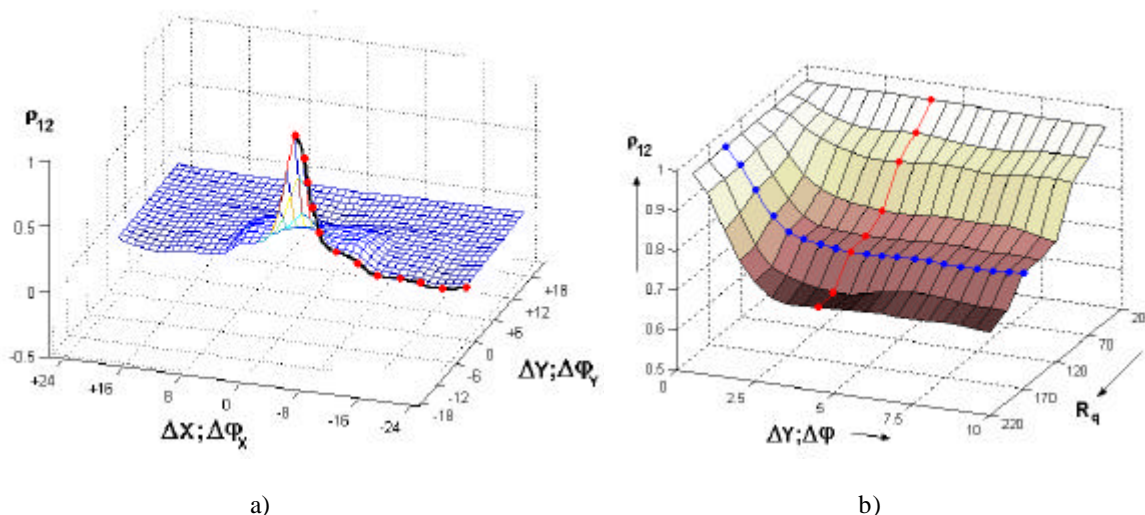


Abbildung 5.8 a) Die vollständige 2D Korrelationsfunktion und die auszumessende Halb-Trajektorie
b) Korrelationskoeffizienten als Funktion der Rauigkeit und der Einfallswinkeländerung/Verschiebung

Nimmt man an, dass das Rauigkeitsprofil isotrop ist, dann ist diese Halb-Trajektoriestrecke ausreichend, das Verhalten der Korrelationsfunktion und damit die Rauigkeit zu beschreiben.

Werden die zu unterschiedlichen Rauigkeiten gehörigen Kurven in einem Diagramm zusammengefasst, ergibt sich eine der Abbildung 5.8/b ähnliche 2D Oberflächenfunktion.

Hinsichts der Auswertung ist ein anderer Querschnitt dieser Oberfläche wesentlich: die Beziehung zwischen Korrelationswert und Rauigkeit, die in der Abbildung als eine rote Kurve darstellt ist. Die Optimierung der Kreuz-Korrelationsauswertung umfasst dabei die Auswahl derartigen Querschnitt-Kurven, mit den die Vermessung in einem möglichst breiten Intervall und mit möglichst hoher Genauigkeit ausgeführt werden kann.

5.3.1. Angulare Kreuz-Korrelation (ASK)

Die angularen Korrelationsmessungen wurden an jeder Probe in zehn Punkten (in einem Abstand von 1 mm voneinander) durchgeführt. In jedem Oberflächenpunkt wurde die Korrelationsfunktion in beiden Richtungen dreimal ausgemessen, damit stellt eine Korrelationskurve einen Durchschnitt von dreißig Messungen dar. Das folgende Diagramm 5.9 zeigt die Korrelationsfunktionen von sechs Prüflingen ($\alpha=55^\circ$) mit Winkeländerungen von $\Delta\varphi=0..0.75^\circ$ (die in der Legende befindlichen Nummern 1,4,7.. usw. entsprechen den Zeilennummern in Tabelle 5.1).

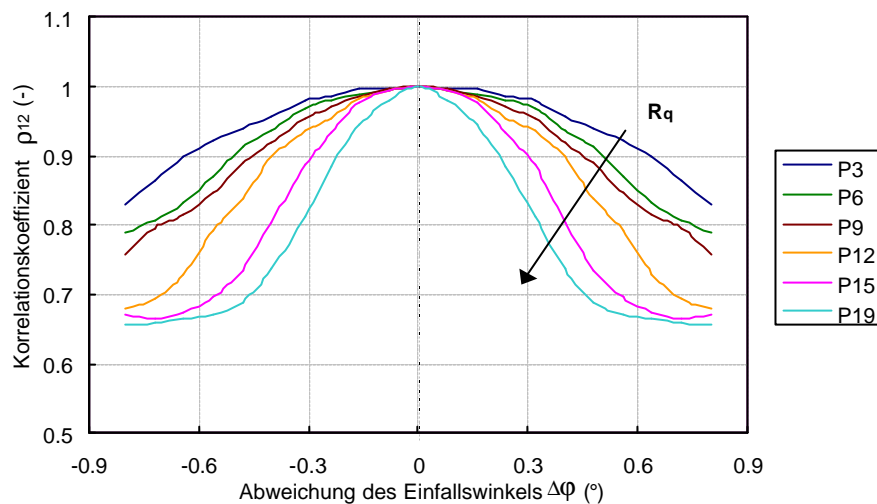


Abbildung 5.9 Messergebnisse für die angulare Kreuz-Korrelation

Im Falle kleiner Rauigkeiten ist die Korrelationsfunktion "flacher", nur bei höheren Winkeländerungen weicht sie beträchtlich von Eins ab. Bei rauheren Proben fällt die Kurve schneller ab, der Korrelationskoeffizient nimmt bereits bei kleinen Winkeländerungen niedrigere Werte an. Weitere wesentliche Bemerkung ist, dass die Korrelationen mit Zunahme der Winkeländerung zu einem Extremwert von 0.6-0.65 streben.

Angeichts der Kalibrierung sind die Rauigkeits-Korrelationskoeffizient Diagramme 5.10 und 5.11 von größerer Bedeutung. Dabei wurden die Ergebnisse in beiden Richtungen gemittelt, damit repräsentiert ein Kurvenpunkt den Mittelwert von sechzig Vermessungen. Es ist sowohl für Gesamt- als auch für teilweise Reflexionen Fakt, dass der Korrelationskoeffizient mit Zunahme der Rauigkeit monoton fällt.

Im Falle der Gesamtreflexion und bei relativ kleiner Winkeländerung ($\Delta\varphi=0.2^\circ$) verursacht die Rauigkeitszunahme keine erhebliche Veränderung in der Korrelation, die $R_q\text{-}\rho_{12}$ Kurve besitzt eine niedrige Steilheit und ermöglicht noch keine befriedigende Vermessung. Bei hoher Winkeländerung ($\Delta\varphi=0.6\text{-}0.8^\circ$) ist die vorher erwähnte Erscheinung zu entdecken: mit Zunahme der Rauigkeit sinken die Korrelationswerte nach einer bestimmten Grenze nicht mehr, was als eine immer längere horizontale Strecke im Diagramm auftritt. Obwohl die Steilheiten der $R_q\text{-}\rho_{12}$ Kurven und damit die Messgenauigkeiten hoch sind, stellt der schmale Messbereich einen Nachteil dar.

Die optimalen Winkeländerungen können im Bereich von $\Delta\varphi=0.4\text{-}0.5^\circ$ festgestellt werden, wo die Rauigkeitsabhängigkeit der Korrelation stark ist, die untere Grenze aber noch nicht

erreicht wird. Ein solchen Fall zeigt die mit dicker Linie gezeichnete Kurve bei $\Delta\varphi=0.4^\circ$. Das Messsystem wurde für eine Winkeländerung von $\Delta\varphi=0.45^\circ$ kalibriert, zu den Messpunkten wurde ein Regressionspolynom vierter Ordnung gefittet.

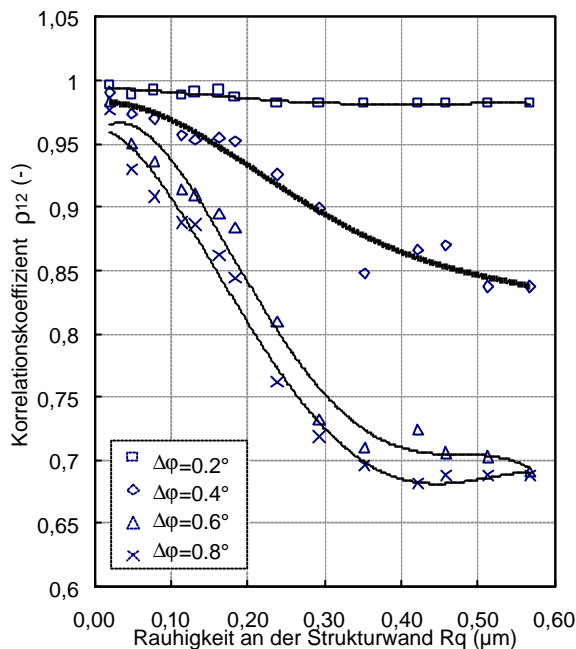


Abbildung 5.10 Angulare Korrelation für störungsfreie Reflexion ($\alpha=55^\circ$)

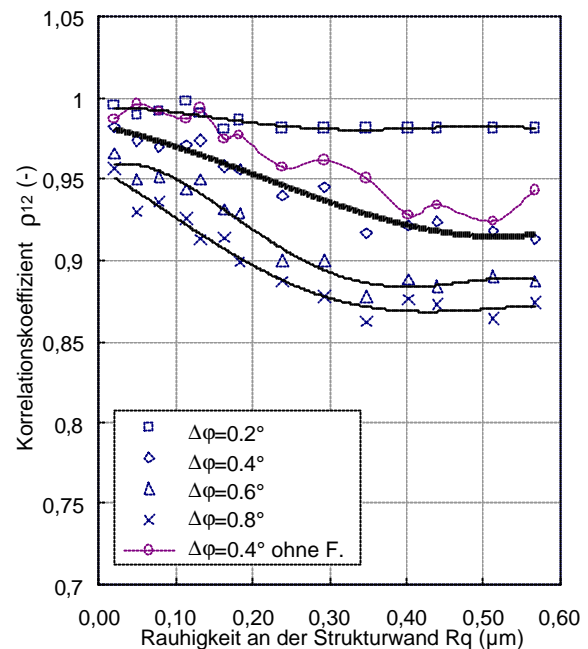


Abbildung 5.11 Angulare Korrelation für gestörte Reflexion ($\alpha=90^\circ$)

Ein ähnliches Verhalten weisen die angularen Korrelationskurven für teilweise Reflexion auf. Ein grundsätzlicher Unterschied liegt in den höheren Koeffizientenwerten und dadurch in der niedrigeren Messgenauigkeit. Zur Ausmessung des gesamten Rauigkeitsbereiches sind ebenfalls Winkeländerungen von $\Delta\varphi=0.4-0.5^\circ$ erforderlich. Im Diagramm 5.11 zeigt die kontinuierliche lila Linie solche Korrelationswerte, wobei die von sekundärer Reflexion stammenden Störungen aus den Speckleverteilungen nicht beseitigt wurden. Vor allem bei niedrigen Rauigkeiten – bei denen die Intensität der Niederfrequenz-Speckles, d.h. des Messsignals klein ist – zeigt sich eine beträchtliche Abweichung: die Messunsicherheit wird durch den Filterprozess bedeutend reduziert. Das kalibrierte Messsystem wendet natürlich die gefilterten Verteilungen an und berechnet die Rauheitskenngrößen bei einer Winkeländerung von $\Delta\varphi=0.45^\circ$ mit polynomischer Annäherung vierter Ordnung.

Nach der Auswahl der optimalen $\Delta\varphi$ und in Kenntnis der Regressionskonstante ist es bei praktischen Vermessungen unnötig, die vollständige Korrelationsfunktion zu bestimmen. Nach dem Einzug der ersten Referenzaufnahme und Einstellung der vordefinierten Winkeländerung kann gleich die zweite Speckleverteilung aufgenommen werden. Dadurch lässt sich die Messzeit wesentlich abkürzen und aus mehreren solchen Einzelmessungen kann ein stabiler Korrelationswert durch Mittelwertbildung berechnet werden. Für derartige Vermessungen ist die Softwareoption "schnelle angulare Korrelationsmessung" einzusetzen.

Zusammenfassend kann die angulare Korrelation in dem gesamten, mikrotechnisch relevanten Rauigkeitsbereich, sowohl für Gesamt- als auch für teilweise Reflexion, mit $\Delta\varphi=0.45^\circ$ vordefinierten Einfallswinkeländerung eingesetzt werden.

5.3.2. Örtliche Kreuz-Korrelation (OSK)

Bei Kalibrierung von Ortskorrelationsauswertung wurden die Korrelationsfunktionen - ähnlich wie bei der ASK - in zehn Oberflächenpunkten bestimmt. Jede Vermessung bestand aus 25 Messpunkten und wurde dreimal wiederholt in beiden Richtungen: ein Funktionswert stellt daher einen Durchschnitt von dreißig Messwerten dar. Die Prüflinge wurden beginnend von Anfangsposition in 1 μm -Schritten verschoben, in einer Messstrecke von insgesamt 25 μm . Das folgende Diagramm 5.12 stellt die Ortskorrelationsfunktionen von sechs ausgewählten Proben ($\alpha=55^\circ$) dar.

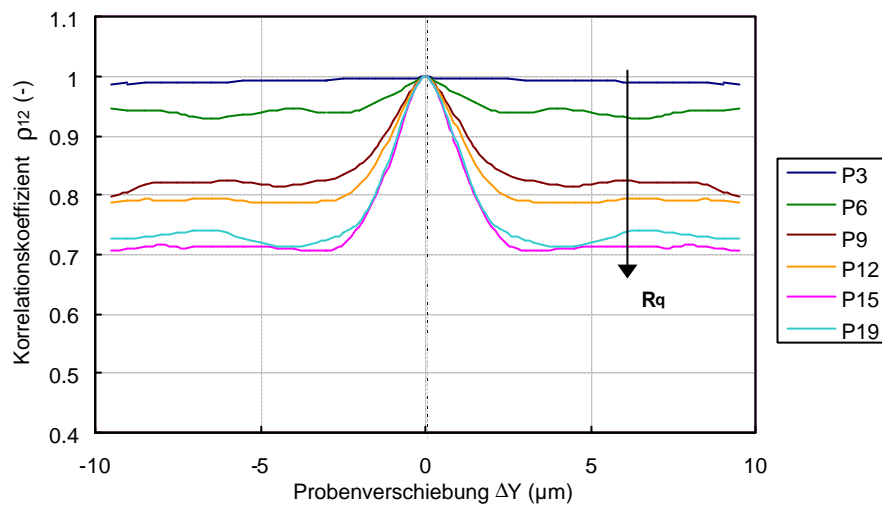


Abbildung 5.12 Messergebnisse für die örtliche Kreuz-Korrelation

Die Verläufe der Ortskorrelationsfunktionen weisen eindeutige Abweichungen von den Ergebnissen der angularen Korrelation auf. Während die Funktionswerte bei kleinen Probenverschiebungen ($\Delta Y < 3 \mu\text{m}$) ähnlicherweise mit unterschiedlichen Steilheiten sinken, mit Zunahme von ΔY streben die Koeffizientenwerte zu differenten Extremwerten. Obwohl die geringfügigen Schwankungen, die auf die Kurven überlagert sind, die Bestimmung von Konvergenzgrenzen erschweren, die vom Verschiebungsgrad unabhängige Korrelation ermöglicht eine einfachere Vermessungsweise. Abbildungen 5.13 und 5.14 zeigen die Rauigkeits-Korrelationskoeffizient-Diagramme für vier unterschiedlichen Probenverschiebungen von $\Delta Y=2, 4, 6, 8 \mu\text{m}$ (ein Diagrammpunkt stellt den Mittelwert von sechzig Ergebnissen dar).

Mit Zunahme der Probenverschiebung nimmt auch die Rauigkeitsabhängigkeit der Ortskorrelation zu, die Kurven weisen höhere Steilheiten auf. Es weist auf die unterschiedlichen Extremwerte hin, dass die $R_q\text{-}\rho_{12}$ Kurven über einer bestimmten Verschiebung sich nicht mehr verändern, sie fallen beinahe zusammen. Dies vereinfacht die Auswahl von optimalen ΔY : über einer Probenverschiebung von 4-5 μm kann praktisch eine beliebige ΔY gewählt werden. Nach Erfahrungen steigt jedoch die Messunsicherheit bei Probenverschiebungen größer als 10 μm geringfügig an (wegen der starken Schwankung von Korrelationsfunktion).

Eine optimale Wahl stellt allerdings die Anfangsstrecke der ablaufenden Kurven, d.h. eine Probenverschiebung von $\Delta Y=5-6 \mu\text{m}$ dar. Das kalibrierte Messsystem wendet die mit dicker Linie gezeichnete Kennlinie bei $\Delta Y=6 \mu\text{m}$ an, die Rauigkeitsparameter werden mit einer polynomischen Regression vierter Ordnung berechnet.

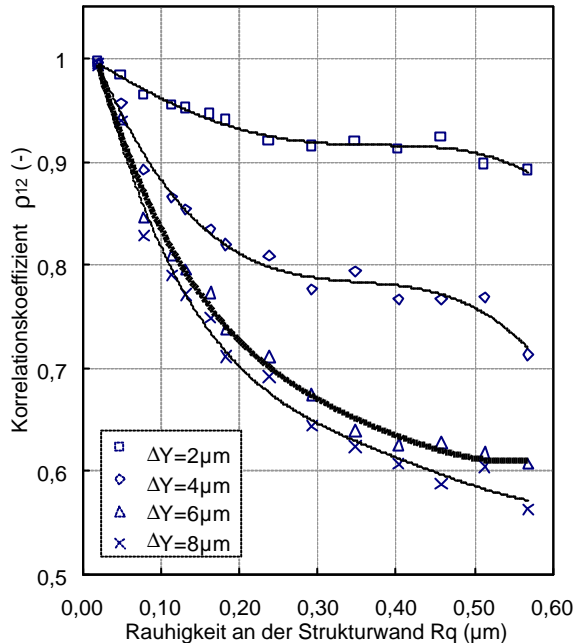


Abbildung 5.13 Örtliche Korrelation für störungsfreie Reflexion ($\alpha=55^\circ$)

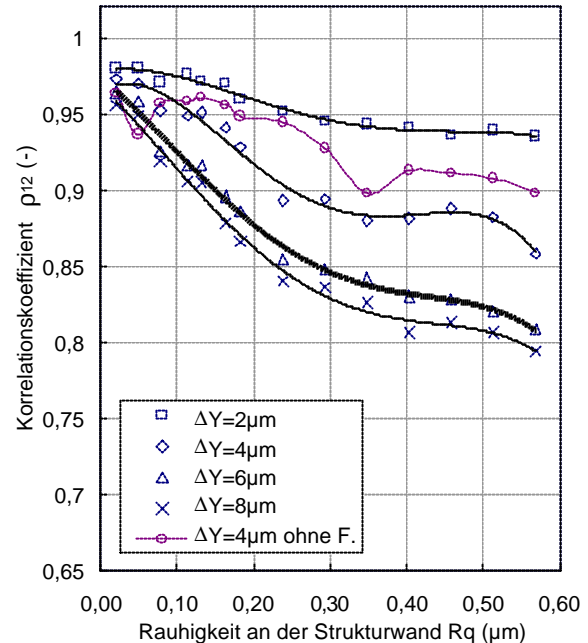


Abbildung 5.14 Örtliche Korrelation für gestörte Reflexion ($\alpha=90^\circ$)

Im Falle der teilweisen Reflexion ist es für die Ergebnisse zu bemerken, dass der Filterprozess ebenso einen positiven Einfluss auf den Rauigkeits-Korrelationskoeffizient Zusammenhang ausübt. Dies wird durch die mit ungefilterten Verteilungen berechneten Ergebnissen (lila kontinuierlichen Linie) im Diagramm 5.14 veranschaulicht. Im Vergleich zur Gesamtreflexion nehmen die Korrelationskoeffizienten ihre Werte in einem schmaleren Bereich auf, die Funktionssteilheiten sind niedriger, wodurch die Messunsicherheit auch höher liegt. Für praktische Vermessungen wird ebenfalls eine Probenverschiebung von $\Delta Y=6 \mu\text{m}$ benutzt, das Regressionspolynom ist in Abbildung 5.13 mit dicker Linie dargestellt.

Zur Berechnung des optischen Rauigkeitsparameters ist die Bestimmung der vollständigen Korrelationsfunktion hierbei auch unnötig. Aus dem Referenzmuster und aus einer zweiten Aufnahme mit einer Probenverschiebung von 4-6 μm kann der Koeffizientwert schnell bestimmt werden (Softwareoption "Schnelle Ortskorrelationsmessung").

Damit kann die Ortskorrelation gleichfalls in dem gesamten relevanten Rauigkeitsbereich, sowohl für störungsfreie- als auch für gestörte Reflexionen mit einer vorherig festgestellten Probenverschiebung von $\Delta Y=6 \mu\text{m}$ angewendet werden.

An dieser Stelle ist es zu bemerken, dass obwohl in der Literatur i.a. die spektralen und die angularen Korrelationen erwähnt sind, die aus den statistischen Kenngrößen abgeleitete - und aus gewisser Hinsicht neuartige - Ortskorrelation kann in diesem Spezialfall effektiver verwendet werden.

5.4. Auto-Korrelation (AKF)

Zur Kalibrierung ist es zweckmäßig, den Auto-Korrelationskoeffizienten - ähnlich wie in vorherigen Fällen - zuerst in Abhängigkeit der Bildverschiebung darzustellen. Damit erhalten wir die zur Oberfläche gehörigen Auto-Korrelationsfunktionen, die für die ersten sechs Prüflinge im Diagramm 5.15 angezeigt sind. Obwohl die Korrelationsfunktion in diesem Fall in beiden Koordinatenrichtungen zu berechnen wäre, in der Praxis wird nur eine Koordinate benutzt. Anhand vorläufiger Berechnungen fallen die Auto-Korrelationen bei Bildverschiebungen in der i-Richtung plötzlich ab und charakterisieren die Oberfläche nicht. Die in j-Richtung berechneten AKF Funktionen weisen dagegen im Zentralbereich von der Rauigkeit abhängig unterschiedliche Steilheiten auf (Abbildung 5.15).

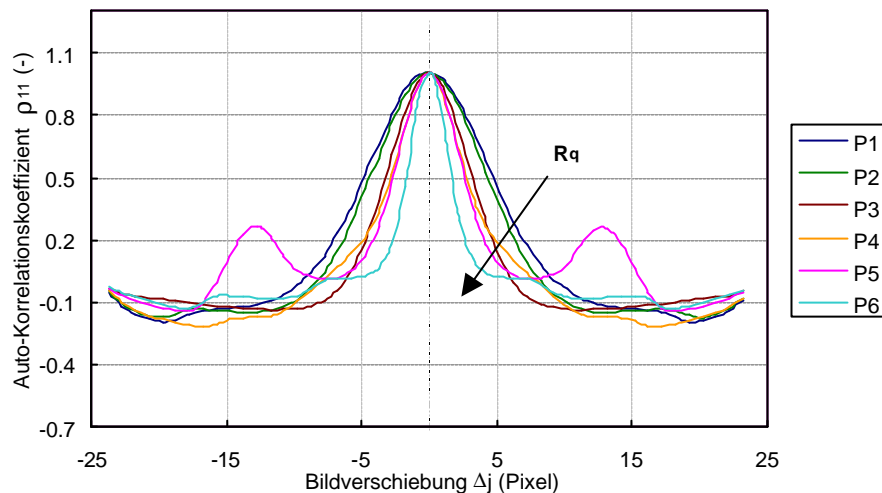


Abbildung 5.15 Messergebnisse für die Auto-Korrelation

Im Diagramm 5.16 sind die mit $\Delta j = 4$ Pixel Bildverschiebung berechneten Auto-Korrelationskoeffizienten in Funktion der R_q -Rauigkeit dargestellt. Die Diagrammpunkte ergaben sich durch Bildverschiebungen in beiden Richtungen ($-j/+j$) und durch Mittelung von vierzig Ergebnissen. Obwohl die erste Kurvenstrecke eine starke Steilheit zeigt (ρ_{11} ändert sich in dem gesamten 1..0 Bereich) und dadurch ist die Messunsicherheit kleiner als bei der Kreuz-Korrelation, für Rauigkeiten größer als $R_q = 0.18 \mu\text{m}$ verändern sich die Koeffizientenwerte nicht mehr. Daraus ergibt sich ein großer Nachteil der Methode: sie ist ausschließlich für niedrige Rauigkeiten, im Bereich von ca. $R_q = 0-0.15 \mu\text{m}$ einzusetzen. Die dicke Linie stellt die gefittete Regressionskurve (für $\Delta j = 4$ Pixel) dar.

Die gestrichelte Linie repräsentiert dabei die für teilweise Reflexion erhaltenen AKF-Werte. Die Störreflexion beeinträchtigt allerdings den im obigen beschriebenen vorteilhaften Effekt der Auto-Korrelation, für teilweise Reflexion ist sie deshalb nicht zu empfehlen.

Trotz des schmalen Messbereiches hat das Verfahren die günstige Eigenschaft, dass nur eine Speckle-Aufnahme erforderlich ist und dadurch die Messgeschwindigkeit sehr hoch sein kann.

Bei der Auto-Korrelation ist es jedoch fraglich, auf welchen Grund die Rauigkeitsabhängigkeit zurückzuführen ist. Nach Definition beschreibt die AKF die "Selbstähnlichkeit", weswegen sie im Kapitel 3.3 zum Ausrechnen der Speckle Korngröße eingesetzt wurde.

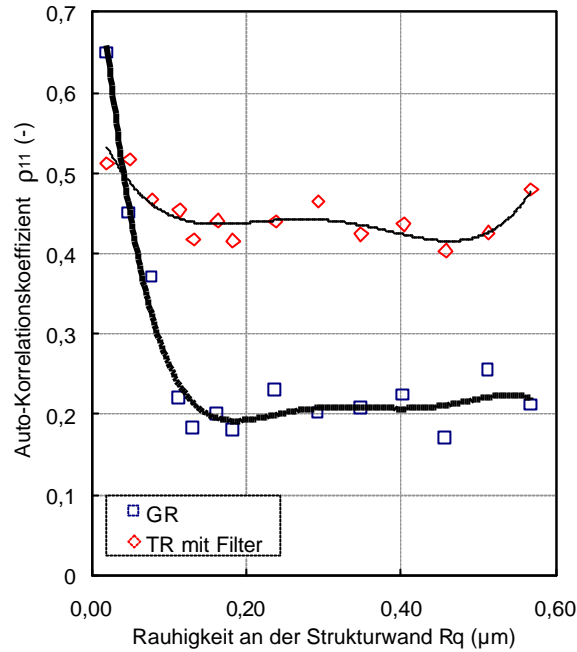


Abbildung 5.16 AKF als Funktion der Rauigkeit

Abbildung 5.17 zeigt die Intensitätsabläufe zweier von unterschiedlich rauher Proben ($R_{qI}=0.025 \mu\text{m}$; $R_{qII}=0.084 \mu\text{m}$) erhaltenen Specklebilder, die neben derselben Beleuchtung aufgenommen wurden: die Wellenlängen, die ausgeleuchteten Spotdurchmesser, die Schirmabstände waren identisch. Infolgedessen können die Specklemuster durch dieselbe Korngröße charakterisiert werden; trotzdem weichen ihre Auto-Korrelationskoeffizienten bei der Bildverschiebung $\Delta j=5$ Pixel ab: $\rho_I=0.83$ und $\rho_{II}=0.69$.

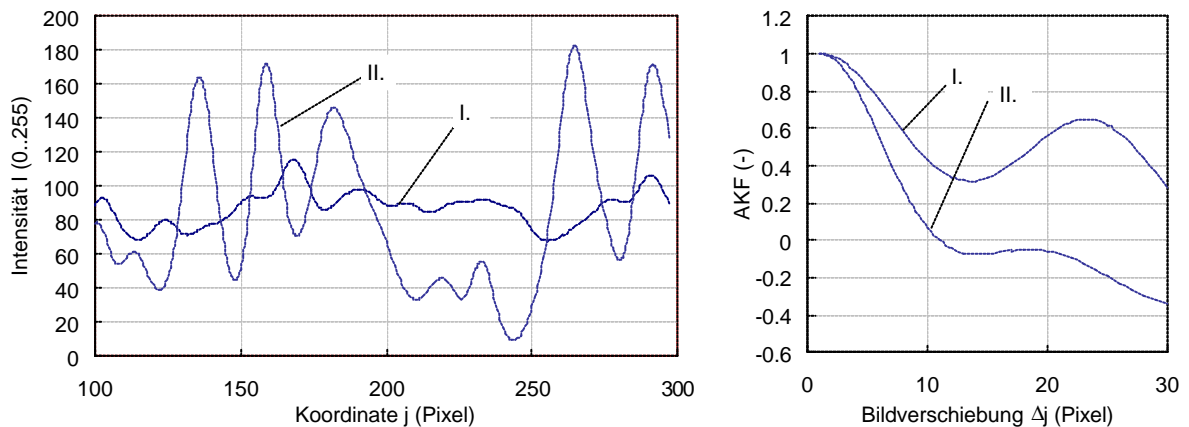


Abbildung 5.17 Einfluss des Speckle-Kontrastes auf die AKF

Der Grund dazu ist in den unterschiedlichen Kontrasten der teilweise ausgebildeten Muster zu suchen: da die Kurve I. "flacher" läuft, bei einer kleinen Verschiebung wird ihre Selbstähnlichkeit naheliegender höher bleiben, als die der stärker modulierten Kurve II. (obwohl ihre typischen Wellenlängen gleich sind). Das heißt, bei teilweise ausgebildeten Specklemustern weist der Auto-Korrelationskoeffizient - ähnlich wie der Kontrast, aber in einer empfindlicheren Weise - auf die Modulationsstärke hin (dieser Zusammenhang ist noch deutlicher, wenn wir bemerken, dass die Auto-Korrelationsformel (3.8) für $\Delta\xi=0$, $\Delta\eta=0$ eben die 2D-Standardabweichung wiedergibt). Ihr Einsatz ist daher vor allem bei spekulär reflektierenden Oberflächen vorteilhaft, wobei sie sogar eine zuverlässigere Beziehung gewährleistet als der Speckle-Kontrast (vergleiche die Abbildungen 5.16 und 5.5).

Kapitel 6.

Analyse der Messunsicherheit

Ein wahrscheinlichkeitstheoretischer Rechenalgorithmus wird abgeleitet, mit dem die Zuverlässigkeit der im vorherigen Kapitel dargestellten Messungen quantitativ beurteilt werden können. Mit dessen Hilfe wird die Güte der einzelnen Methoden verglichen. Anschließend werden die Vor- und Nachteile, die Anwendungsbereiche und die Genauigkeiten der realisierten Verfahren zusammengefasst.

6.1. Interpretation der Messgenauigkeit für parametrische Vermessungen

Den Speckle-Messverfahren können aufgrund ihrer parametrischen Funktionsweise keine exakten Auflösungen zugeordnet werden (gegenüber z.B. den Profilometern). Die mit den einzelnen Methoden und Messparametern erreichbaren Messgenauigkeiten sind daher durch statistische Berechnungen auszuwerten.

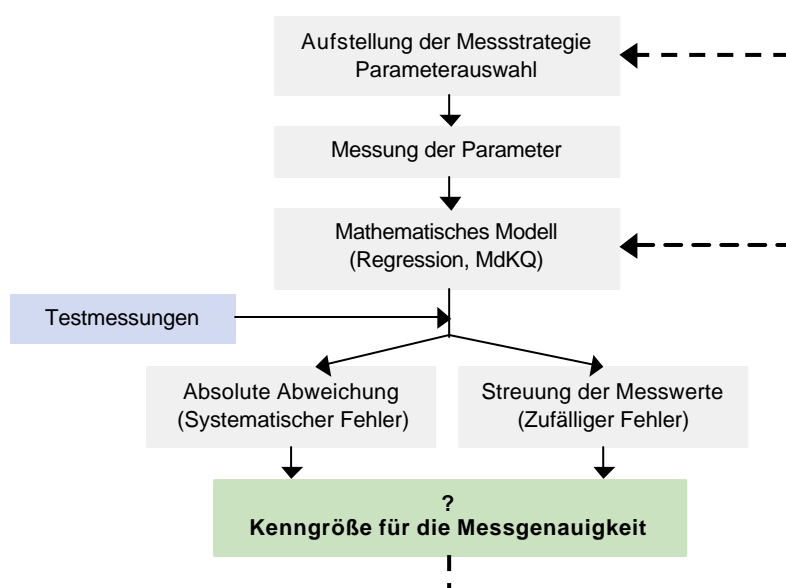


Abbildung 6.1 Ablauf der Bewertung von Messunsicherheit

Zur Untersuchung der Messgenauigkeiten wurden neue Messreihen mit dem bereits kalibrierten Messsystem vorgenommen. Die unterschiedlich rauhen Proben wurden mehrmals nacheinander gemessen, ohne die Einstellungen dabei zu verändern. Die Proben wurden zwischen den Messungen ausgespannt und wieder auf dem Kreutztisch befestigt.

Damit war für jede Probe (Rauheitswert) eine Messserie vorhanden. Daraus lassen sich grundsätzlich zwei Fehlertypen berechnen: die absolute Differenz zwischen dem gemessenen Wert (Durchschnitt der Messwerte) und Genauwert gibt den systematischen Fehler an, während die Verteilung um den Messwert herum die Summe der zufälligen Fehler darstellt. Das Ziel war, die Messgenauigkeit mit einer einzigen objektiven Kenngröße auszudrücken, die gleichzeitig eine Rückkopplung für die Parameterauswahl oder für das mathematische Modell bildet (Abbildung 6.1). Als solche Kenngröße wurde der in der Messtechnik übliche Konfidenzradius gewählt.

Bei Angabe von Messergebnissen wird meistens vorausgesetzt, dass der Durchschnitt der Messwerte und der Genauwert zusammenfallen [20,24]; der Konfidenzradius wird dementsprechend aus der Streuung der Messreihe berechnet. Nach Überlegungen ist es aber einzusehen, dass die Genauigkeit einer parametrischen Vermessung durch beide Fehlertypen beeinflusst wird [35]. Der Grund dafür wird in Abbildung 6.2 erklärt.

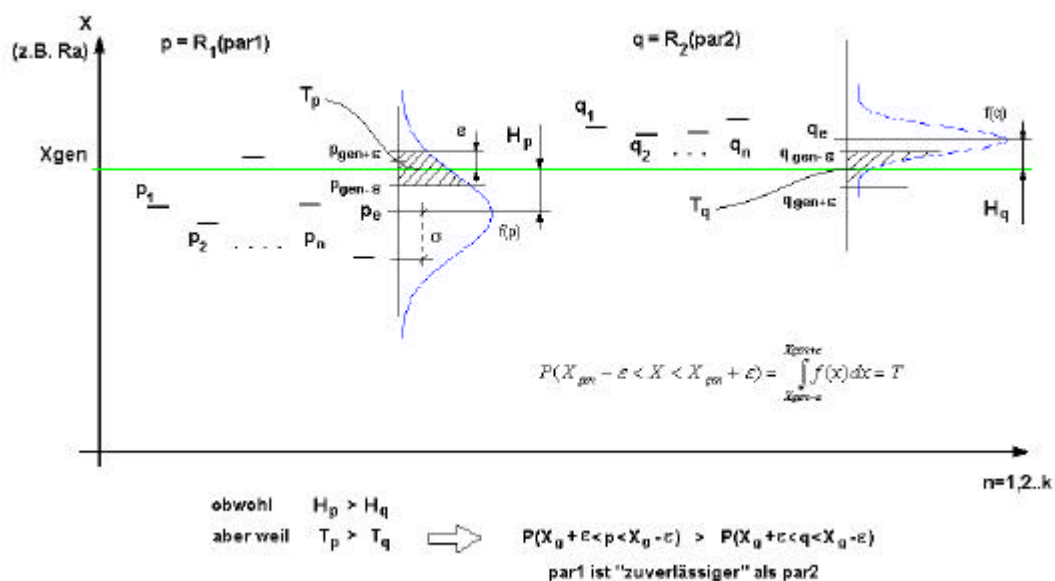


Abbildung 6.2 Interpretation der systematischen und zufälligen Fehler bei parametrischen Vermessungen

Nehmen wir zwei unterschiedlichen Messparameter, p und q an. Man wollte mit beiden Parametern dieselbe Messgröße X bestimmen, wofür wir auch den Genauwert kennen: X_{gen} (waagerechte grüne Linie im Diagramm 6.2). Statt des Genauwertes werden beim p die Ergebnisse p_1, p_2, \dots, p_n und beim q die Ergebnisse q_1, q_2, \dots, q_n gemessen. Die Frage ist nun, für welchen Parameter die Messunsicherheit niedriger ist.

Seien die Durchschnitte der gemessenen Parameter: p_e und q_e (Erwartungswerte), um die herum die Werte p_n und q_n Verteilungen bilden. Die dazugehörigen Verteilungsdichtefunktionen sind als blaue Gauß-Kurven dargestellt: $f_p(x)$ und $f_q(x)$. Die Erwartungswerte fallen mit den Genauwerten offenbar nicht zusammen, die Abweichung ist für p: H_p ; und für q: H_q , die zugleich die absoluten Fehler repräsentieren (im Beispiel-Diagramm 6.2 besitzt der Parameter q einen niedrigeren absolute Fehler). Nun lautet die anfängliche Frage ausgehend von den Dichtefunktionen und den Genauwerten: Wie hoch sind die Wahrscheinlichkeiten bei

den einzelnen Parametern, dass man den Genauwert misst? Dies lässt sich mathematisch folgenderweise ausdrücken:

$$P_p(X_{gen} - e < X < X_{gen} + e) = \int_{X_{gen}-e}^{X_{gen}+e} f_p(X) dX = T_p \quad (6.1)$$

$$P_q(X_{gen} - e < X < X_{gen} + e) = \int_{X_{gen}-e}^{X_{gen}+e} f_q(X) dX = T_q \quad (6.2)$$

worin $\pm e$ ein gegebenes Intervall um den Genauwert herum darstellt. Die Flächen T_p und T_q sind in dem Diagramm mit Schraffierung angezeichnet. Es kann der Fall vorkommen, dass obwohl $H_q < H_p$, für die obigen Wahrscheinlichkeiten gilt: $T_q < T_p$. Das heißt, obwohl der Parameter q einen kleineren Absolutfehler besitzt, taucht dieser Fehler wegen der niedrigen Streuung relativ "stabil" auf und die Wahrscheinlichkeit, dass man den Genauwert misst, ist niedriger.

Die Zuverlässigkeit eines Parameters lässt sich demnach durch die Wahrscheinlichkeit bewerten, dass der Messwert in ein Intervall um den Genauwert fällt. Darauf kann man allein aus dem systematischen oder aus dem zufälligen Fehler nicht folgern, aber ihr Wert - wie es sich in obige Ableitung eindeutig gezeigt hat - wird durch beide beeinflusst.

Will man die Messgenauigkeit nach der praktisch anerkannten Methode mit Konfidenzraden beschreiben, so muss er den obigen Ansatz umkehren: der Wahrscheinlichkeitswert wird zu der üblichen Signifikanz-Stufe von 95 % festgestellt und das zugehörige Konfidenzintervall $\pm r$ wird gesucht. Dieser Fall ist in Abbildung 6.3 veranschaulicht: R bezeichnet einen beliebigen Rauigkeitsparameter, $F_{m,s}(R)$ ist die Verteilungsfunktion mit dem Erwartungswert m und Streuung s und $f_{m,s}(R)$ ist die dazugehörige Dichtefunktion.

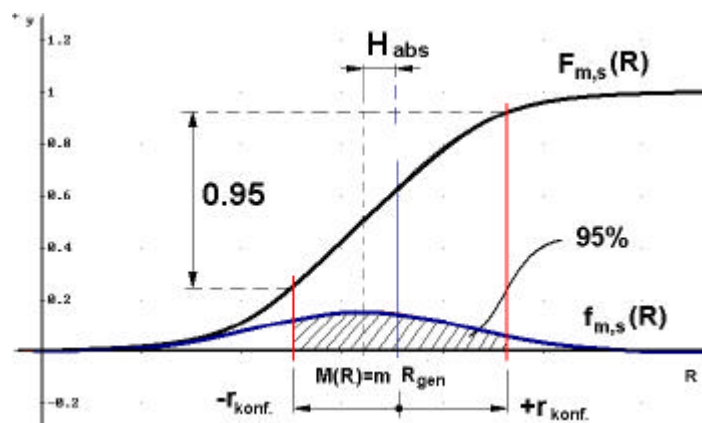


Abbildung 6.3 Interpretation des Konfidenzintervalls für parametrische Vermessungen

Es ist zu errechnen, wie große $\pm r$ -Intervall um einen einzigen Messwert zu nehmen ist, damit der Genauwert mit der Wahrscheinlichkeit 95 % in diesem Intervall liegt. Mathematisch ausgedrückt:

$$r = ? \quad \text{dass} \quad P(R - r < R_{gen} < R + r) = 0.95 \quad (6.3)$$

Anhand weiterer Überlegungen ist es aber einzusehen: weil R eine Zufallsvariable und R_{gen} ein Festwert ist, gilt [35]:

$$P(R - r < R_{gen} < R + r) = P(R_{gen} - r < R < R_{gen} + r) \quad (6.4)$$

Dadurch kann die (6.3) Wahrscheinlichkeit aus der Verteilungsdichte-Funktion des gemessenen Parameters ausgedrückt werden:

$$P(R - r < R_{gen} < R + r) = \int_{R_{gen} - r}^{R_{gen} + r} f_{m,s}(R) dR = F_{m,s}(R_{gen} + r) - F_{m,s}(R_{gen} - r) = 0.95 \quad (6.5)$$

Dass heißt, der um den Messwert gesuchte Konfidenzradius entspricht einem Intervall um den Genauwert, worin die Linienfläche der Dichtefunktion 0.95 beträgt (siehe die schraffierte Fläche im Diagramm 6.3).

6.2. Wahrscheinlichkeitstheoretische Untersuchung der Resultate

Der im vorigen Abschnitt 6.1. abgeleitete Rechnungsgang ist geeignet, die durch alle Fehler ausgelöste Messunsicherheit mit einer einzigen Messgröße, mit dem Konfidenzradius für unterschiedliche Messparameter zu ermitteln. Auf Grund dessen wurden die Messgenauigkeiten in den folgenden Schritten bestimmt:

- erneute Messung von acht Prüflingen (bekannten Seitenwand-Rauhigkeiten) mit dem kalibrierten Messsystem. Bei jedem Prüfling wurden mit allen vier Methoden 25 Vermessungen durchgeführt
- Aus den 25 Messergebnissen wurden die Erwartungswerte, die korrigierten empirischen Streuungen und die absoluten Fehler berechnet. Zu den Ergebnissen wurden Normalverteilungen angepasst und ihre Dichtefunktionen bestimmt.
- Aufnahme eines Anfangsintervalls von $r=\pm 0.1$ um den Genauwert herum. Ausweitung des Intervalls in Schritten $\Delta r=\pm 0.1$ und Berechnung von Wahrscheinlichkeiten $P(R_{gen} - r < R < R_{gen} + r)$ anhand der angepassten Dichtefunktionen. Fortsetzung der Iteration bis zu dem Wert $P=0.95$.
- Registrierung der absoluten Fehler und der zu $P=0.95$ Signifikanz gehörigen Konfidenzradien für jeden Messparameter

Die obige Auswertung ist bei den statistischen Methoden von besonderer Bedeutung: man kann dadurch den Parameter oder die Parameter-Kombination aus den verwendeten vier Messgrößen auswählen, mit dem die höchste Genauigkeit zu erreichen ist. Beispielweise sind die für den R_q erhaltenen absoluten Fehler im Diagramm 6.4 dargestellt (störungsfreie Reflexion).

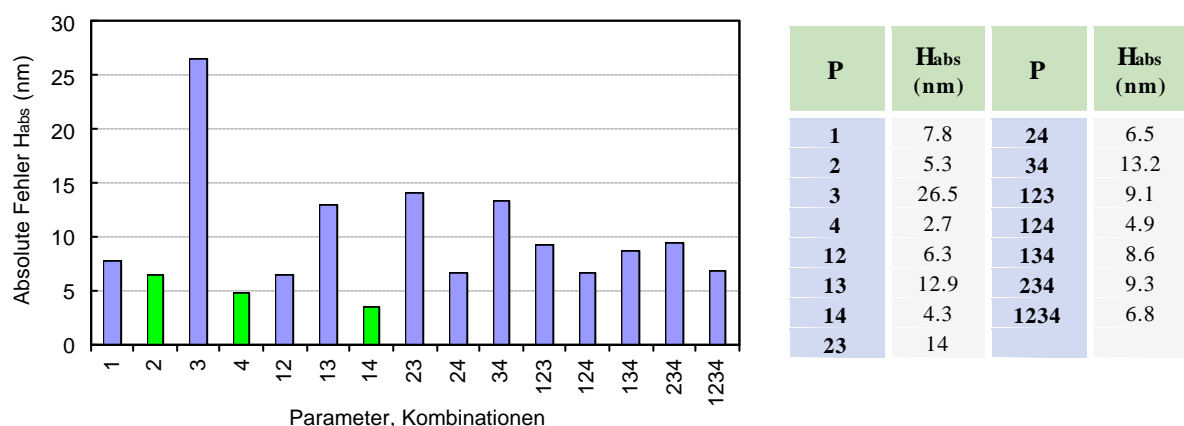


Abbildung 6.4 Absolute Fehler der einzelnen Parameterkombinationen

Es ist im Säulendiagramm gut zu erkennen, dass die kleinsten Absolutfehler beim Parameter 2. (Speckle-Kontrast), beim Parameter 4. (Verteilungs-Differenz) bzw. bei ihrer Kombination 14 auftreten. Unter Parameter-Kombination versteht man, dass die aus mehreren Parametern berechneten Rauigkeitskenngrößen gemittelt werden. Führt man in diesen Fällen die

beschriebene Wahrscheinlichkeitsberechnung durch, erhält man für die Konfidenzintervalle die folgenden Ergebnisse (gemittelt über dem gesamten Rauigkeitsbereich):

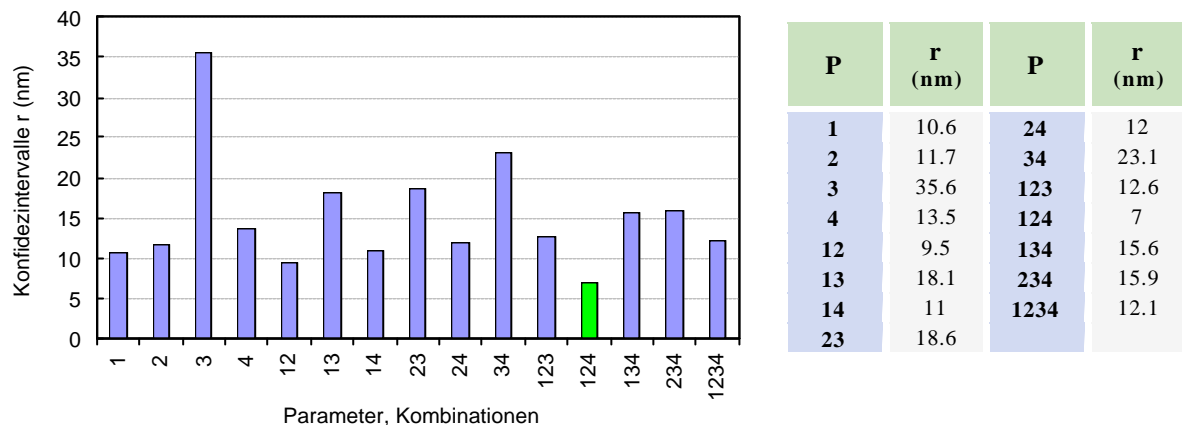


Abbildung 6.5 Berechnete Konfidenzintervalle der einzelnen Parameterkombinationen

Anhand des Diagramms ist festzustellen, dass der niedrigste Konfidenzradius (± 7 nm) mit der Parameter-Kombination 124 zu erreichen ist, obwohl diese Kombination nicht den niedrigsten Absolutfehler aufweist. Es zeigt sich daraus, dass man sich allein auf den absoluten Fehler oder auf die Ergebnisstreuung für Bewertung der Messgenauigkeit nicht verlassen darf.

Es ist noch zu bemerken, dass die absoluten Fehler, die Streuungen und die Konfidenzradien sich von der Rauigkeit abhängig verändern. Deswegen ist es zweckmäßiger, die Genauigkeitskenngrößen nur innerhalb des Anwendungsbereiches der einzelnen Methoden zu berechnen und sie relativ, in Prozent des Genauwertes auszudrücken. Diagramm 6.6 stellt die so berechneten Ergebnisse für alle vier Messmethoden sowohl bei teilweiser- als auch bei Gesamtreflexionen (für Rauigkeitsparameter R_q) dar.

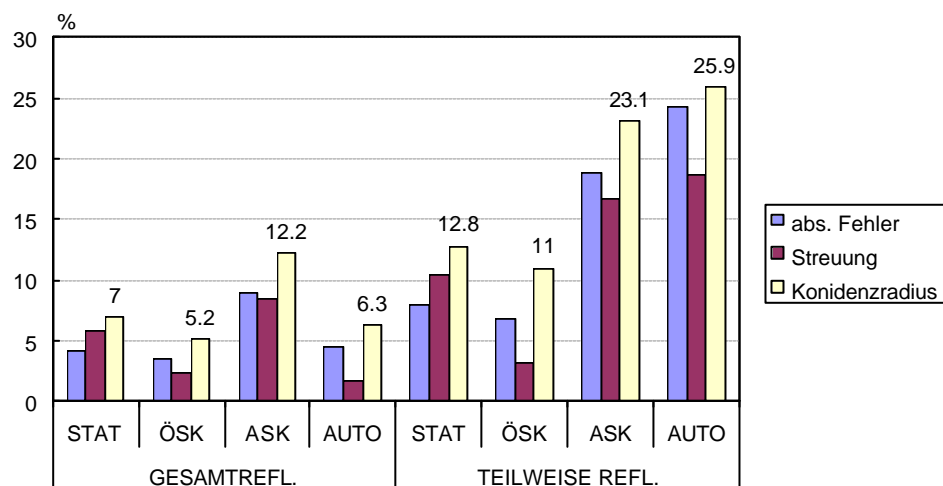


Abbildung 6.6 Relative Konfidenzintervalle der Speckle-Methoden

Im allgemeinen gilt, dass mit Erfassung des vollständigen Specklefeldes ein schmaleres Konfidenzintervall erreicht werden kann, die Messgenauigkeit ist höher. Die Zuverlässigkeit der statistischen Methoden wird hauptsächlich durch die starke Streuung von Ergebnissen (zufällige Fehler) beeinflusst. Die Korrelationsmethoden werden dagegen durch eine niedrige Streuung und damit durch eine stabilere Funktionsweise charakterisiert. Die angulare

Korrelation weist bei beiden Reflexionsarten eine relativ niedrige Genauigkeit auf, was auf die Vernachlässigung von Streuwinkeländerung zurückgeführt werden kann (siehe Abschnitt 4.2). Die Auto-Korrelationsauswertung lässt sich für Gesamtreflexion und für niedrigere Rauigkeiten mit einer höheren Genauigkeit einsetzen als die statistischen Vermessungen, zur teilweisen Reflexion ist aber unanwendbar. Bei steilen Seitenwänden (teilweise Reflexion) ergeben vor allem die Ortskorrelation und statistische Methoden zuverlässigere Ergebnisse.

Als Schlussergebnis lassen sich die Konfidenzintervalle von messbaren Rauigkeitsparametern folgenderweise zusammenfassen (Tabelle 6.1):

| Par. | Relative Konfidenzintervalle (± %) | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------------|-----|------|------|---------------------|------|------|------|
| | Gesamtreflexion | | | | Teilweise Reflexion | | | |
| | STAT | OSK | ASK | AUTO | STAT | OSK | ASK | AUTO |
| R_a | 7.5 | 7.2 | 8.2 | 7.3 | 15.6 | 11.5 | 25.3 | 29.7 |
| R_q | 7 | 5.2 | 12.2 | 6.3 | 12.8 | 11 | 23.1 | 25.9 |
| R_{zdin} | 9.3 | 8.4 | 10.1 | 9.5 | 9.7 | 10.4 | 31.4 | 32.1 |
| R_{ziso} | 8.9 | 7.8 | 9.8 | 8.7 | 10.6 | 9.4 | 29.5 | 35 |

Tabelle 6.1 Relative Konfidenzintervalle für die messbaren Rauheitswerte

Damit können die relevanter Zuverlässigkeitsintervalle im Bereich von 5-10 % festgestellt werden (die Möglichkeiten mit größeren Konfidenzradien sind offenbar zu vermeiden). Angesichts der in Mikrotechnik üblichen Rauigkeitswerten stellt dies einen Konfidenzradius von $\pm 7..14$ nm dar (für die Signifikanzstufe 95 %).

Die schmalen Zuverlässigkeitsintervalle für Parameter R_q weisen daraufhin, dass der quadratische Mittelwert der Profilabweichungen die Rauigkeit jeweils genauer beschreibt, als die arithmetischen Mittelwerte R_a oder R_z.

Ein erheblicher Vorteil von optischen Oberflächenmessverfahren ist die hohe Geschwindigkeit. Die realisierten statistischen und Kreuz-Korrelationsmessungen benötigen auch nicht mehr als 10-30 Sek. zur Vermessung einer Seitenwand, bei Auto-Korrelation liegt der Zeitaufwand gegen einigen Sekunden. Die Messzeit kann allerdings von der erwünschten Genauigkeit und Messstrecke abhängig unterschiedlich sein. Die Genauigkeiten, die Anwendungsbereiche und weitere Vorteile/Nachteile der untersuchten Methoden sind in der Tabelle 6.2 zusammengefasst.

| Methode | Rq (μm) | $\pm r$ (nm) | Vorteile | Nachteile |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---|--|
| Örtliche Korrelation | 0.1-0.5 | 8.85 | <ul style="list-style-type: none"> • stabile Vermessung • großer Messbereich • schnell • auch für teilweise Reflexion | <ul style="list-style-type: none"> • empfindlich gegen Einstellungs- und Positionierungsfehler |
| Angulare Korrelation | 0.1-0.5 | 10.8 | <ul style="list-style-type: none"> • stabile Vermessung • großer Messbereich | <ul style="list-style-type: none"> • empfindlich gegen E/P-Fehler • langsam • nur für Gesamtreflexion |
| Auto-Korrelation | 0-0.15 | 8.2 | <ul style="list-style-type: none"> • sehr schnell | <ul style="list-style-type: none"> • geringer Messbereich • nur für Gesamtreflexion |
| Speckle-Statistik | 0-0.25 | 9.1 | <ul style="list-style-type: none"> • unempfindlich gegen E/P-Fehler • einfache Auswertung • weitere Kalibrierungsmöglichkeiten • auch für teilweise Reflexion | <ul style="list-style-type: none"> • begrenzter Messbereich |

Tabelle 6.2 Vorteile/Nachteile von Speckle-Messverfahren

Kapitel 7.

Numerische Simulation des Verfahrens mit Hilfe der skalaren Beugungstheorie

Durch Anwendung der skalaren Beugungstheorie wird eine Rechenmethode ausgearbeitet, mit der beliebige Speckle-Messanordnungen modelliert werden können. Mit den geometrischen Parametern der realisierten Anordnung werden eindimensionale Modelle zu den Messungen aufgestellt. Die Simulationsergebnisse werden mit den praktischen Messungen verglichen. Durch die rechnerische Modellierung können auch praktisch nicht ermittelbare Effekte analysiert werden (Einfluss der Korrelationslänge, Funktion außerhalb des untersuchten Rauheitsbereichs).

7.1. Grundlagen aus der skalaren Beugungstheorie

Bei statistischer Auswertung von Speckleverteilungen erhebt sich i.a. der Anspruch auf die theoretische Modellierung der Methoden, mit der die praktischen Ergebnisse nachgewiesen werden können. Zur rein theoretischen Behandlung der Erscheinung sind viele Vernachlässigungen notwendig: die Amplituden wurden einfach als Summen komplexer Zeiger betrachtet; parallele Objekt- und Beobachtungsebenen wurden vorausgesetzt; die Materialeigenschaften wurden vernachlässigt etc. [14,27,65,76]. Die auf skalarer Beugungstheorie basierenden Simulationsberechnungen hatten drei Ziele:

- Genauere und spezifiziertere theoretische Analyse durch die Kirchhoffsche Beugungstheorie
- Nachweis der Richtigkeit des Messprinzips und der Messergebnisse
- Möglichkeit zur Untersuchung der Realisierbarkeit von beliebigen Speckle-Auswertungen

Da die realen Speckle-Vermessungen wegen den eventuellen Mehrfachreflexionen und der speziellen Anordnung eine komplexere Beschreibung erfordert, wurde das Simulationsmodell in zwei Schritten ausgeführt:

- Rechnerische Realisierung des Algorithmus vom skalaren Kirchhoff-Prinzip. Beugung an einer einzigen rauhen Oberfläche, einer Koordinate entlang, mit einfacher optischen

Anordnung (parallele Oberfläche-Schirm). Übereinstimmung mit den theoretischen Beziehungen.

- Vollständige Simulation der Vermessungen mit realer Anordnung, mit einfachen und mehrfachen Reflexionen: Speckle-Kontrast, Kreuz- und Auto-Korrelationen.

Im Falle der skalaren Beugungstheorie wird die durch Maxwell-Gleichung gesetzte Beziehung zwischen der elektrischen- und magnetischen Feldvektorkomponenten vernachlässigt: der Zustand des elektromagnetischen Feldes wird in jedem Punkt durch eine skalare Feldstärke beschrieben. Man wendet damit eine Vektor-Skalar Funktion an, deren Funktionswerte die komplexe Amplituden $A(\vec{x})$ sind. Die beiden Komponenten der Komplexamplitude können als die elektrischen- und magnetischen Feldstärken eines zirkular polarisierten Lichtes angesehen werden.

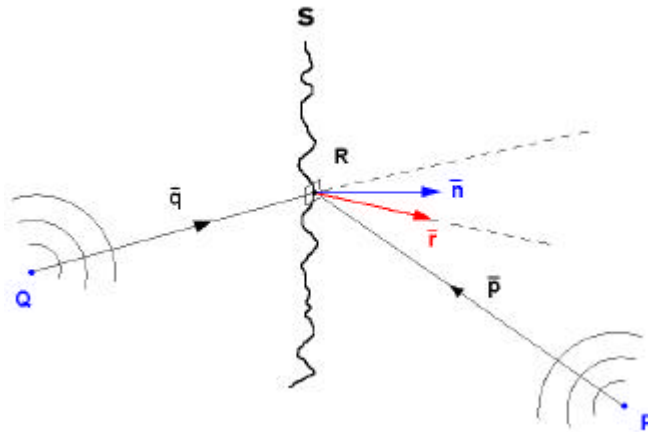


Abbildung 7.1 Geometrische Anordnung zum Kirchhoffschen Beugungsintegral

Die Theorie wurde konventionell zur Beschreibung der Lichtbeugung an einem freien Spalt im optischen Strahlengang abgeleitet. Betrachtet man nun die reflektierende raue Oberfläche als eine beugende Apertur, die die Ausbreitungsrichtung des Lichtes beeinflusst, so kann die komplexe Lichtamplitude im Punkt P mit skalarer Beugungstheorie wie folgt ausgedrückt werden [27,45,51]:

$$A(P) = \frac{1}{i\lambda} \int_S \frac{e^{ik(\vec{p} + \vec{q})}}{\vec{p}\vec{q}} \cdot \frac{\cos(\vec{r}, \vec{q}) - \cos(\vec{r}, \vec{p})}{2} dS \quad (7.1)$$

wobei \vec{q} den Vektor der Einfallsrichtung und \vec{p} den Vektor der Streurichtung bezeichnet. Dabei stehen (\vec{r}, \vec{q}) und (\vec{r}, \vec{p}) für die Winkel zwischen dem Reflexionsvektor und den Einfalls- bzw. Streurichtungen. Der Ausdruck (7.1) ist als Kirchhoffsche Beugungsintegral bekannt und gibt eine exakte Beziehung für die Amplitude eines beliebigen Beugungsfeldpunktes.

Die im Beugungsintegral befindlichen Winkel können mit den lokalen Einfalls- und Streuwinkeln in Zusammenhang gebracht werden. Dafür betrachten wir die folgende Abbildung, worin die Reflexionsverhältnisse im Punkt R (aus Abbildung 7.1) dargestellt sind.

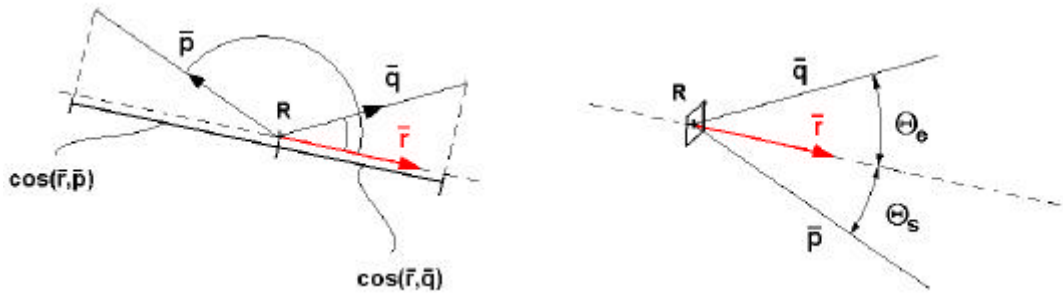


Abbildung 7.2 Definition der lokalen Einfalls - und Streurichtungen

Da $\Theta_e = (\vec{r}, \vec{q})$ und $\Theta_s = 180 - (\vec{r}, \vec{p})$ gelten, sind $\cos(\vec{r}, \vec{q}) = \cos(\Theta_e)$ und $\cos(\vec{r}, \vec{p}) = -\cos(\Theta_s)$. Damit ergibt sich die Formel (7.1) zu:

$$A(P) = \frac{1}{iI} \int_s \frac{e^{ik(\vec{p} + \vec{q})}}{\vec{p}\vec{q}} \cdot \frac{\cos(\Theta_e) + \cos(\Theta_s)}{2} dS \quad (7.2)$$

Die Kosinus-Terme im zweiten Teil der Integrale 7.1 und 7.2 werden in der Literatur als Neigungsfaktor bezeichnet und nehmen den Wert zwischen 0 und 1 an. Falls die Einfalls- und Streurichtungen mit dem Reflexionsvektor zusammenfallen (senkrechter Einfall / senkrechte Beobachtung), dann nimmt er den Maximalwert Eins an; mit Abweichung irgendeiner der Richtungen fällt er ab. Daraus ist ersichtlich, dass der Neigungsfaktor die Strahlungsstärke abweichend von der Hauptausbreitungsrichtung "unterdrückt", in der Rückwärtsrichtung sogar vollständig eliminiert. Im Kenntnis der lokalen Einfalls- und Streurichtungen lässt sich der Neigungsfaktor in jedem Oberflächenpunkt bestimmen.

7.2. Generierung fiktiver Oberflächenprofile als diskrete mathematische Funktionen

Es war eine Voraussetzung für die Simulationsrechnungen, solche künstlich generierten Profilformen zu verwenden, die die realen mikrotechnischen Oberflächen am besten annähern. Erfordernisse an die fiktiven Profilformen waren:

- Mittelwertfreiheit (Durchschnitt der Profilhöhen sei Null),
- Normalverteilung
- Einstellbarkeit von Profiltiefen und von charakteristischen Wellenlängen.

Die Sequenzen wurden jeweils anhand zwei praktischer Parameter, der quadratischen Profilabweichung (R_q) und der Korrelationslänge (Λ_k) generiert. Um die Sequenzen rekonstruierbarer zu erzeugen, wurden zwei Methoden aus der Literatur eingesetzt: der Zusammenhang von Frieden [20] zur Generierung von normalverteilten Zufallszahlen und das "Moving Average" Verfahren von Fung und Ogilvy [23,51] zur Erzeugung beliebiger Korrelationslänge aus einer gegebenen Zufallszahlreihe.

Die nachstehenden Diagramme stellen drei mit dem realisierten Verfahren erzeugte Profilformen dar, die unterschiedliche R_q -Parameter und Korrelationslängen aufweisen.

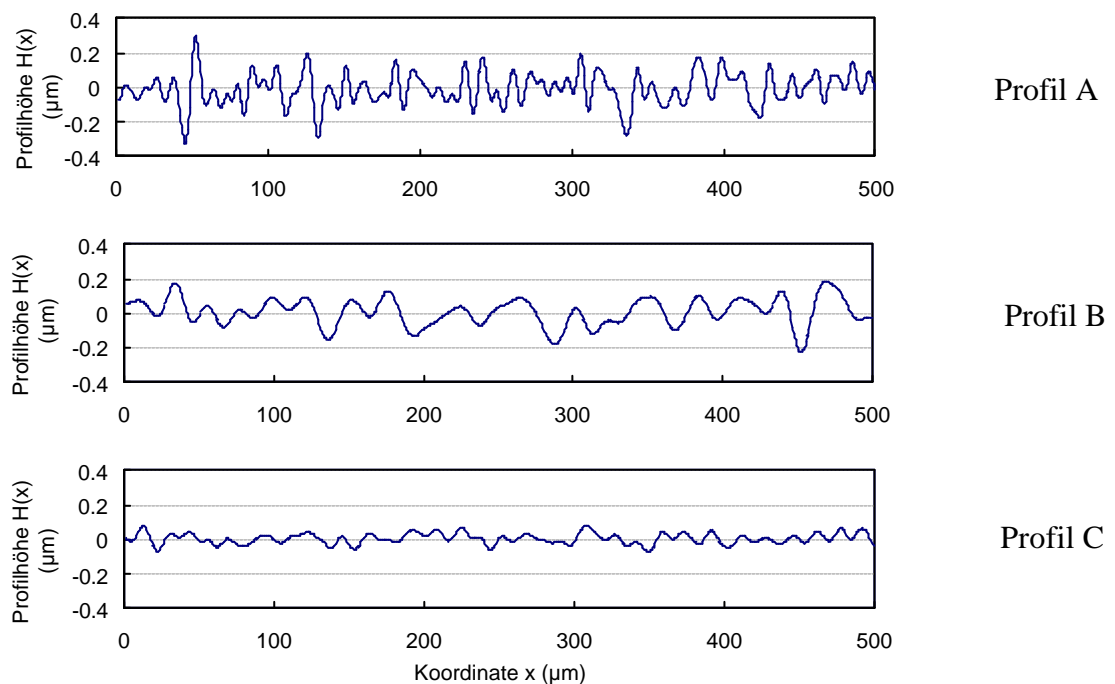


Abbildung 7.3 Generierte Oberflächenprofile mit unterschiedlichen Rauheitstiefen und Korrelationslängen,
A: $R_q=0.1 \mu\text{m}$, $\Lambda_k=2 \mu\text{m}$ B: $R_q=0.1 \mu\text{m}$, $\Lambda_k=4 \mu\text{m}$ C: $R_q=0.03 \mu\text{m}$, $\Lambda_k=4 \mu\text{m}$

Zum Prüfen der Richtigkeit der Methode sind die typische Kenngrößen zurückzurechnen. Für den Parameter $R_q=0.1 \mu\text{m}$ der Profile A und B ergeben sich die Werte $\sigma_A=0.093 \mu\text{m}$ und $\sigma_B=0.098 \mu\text{m}$. Zum Sollwert $R_q=0.03 \mu\text{m}$ des Profils C kann $\sigma_C=0.0304 \mu\text{m}$ berechnet werden.

Die Profilhöhe-Verteilungen der Oberflächen A und C sind in den Diagrammen 7.4 dargestellt. Die Histogramme zeigen typische Gauß-Kurven, die auf die erforderte Normalverteilung der Sequenzen $H(x)$ hinweisen.

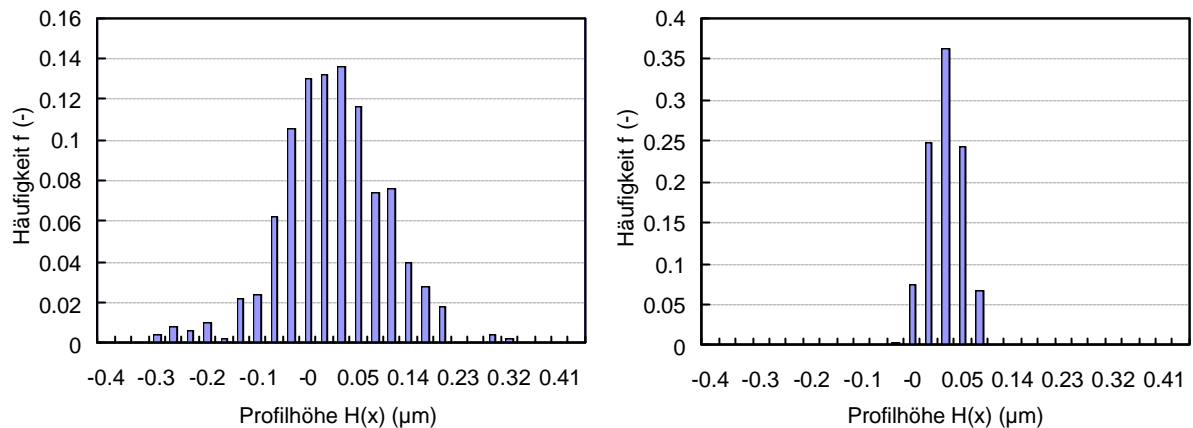


Abbildung 7.4 Profilpunkt-Häufigkeiten der Oberflächen A (links) und C (rechts)

Im Diagramm 7.5 sind die normierten AKF der Höhenprofile A und B gezeigt. Die zu $AKF=1/e \approx 0.36$ Funktionswert gehörigen realen Korrelationslängen sind: $\Lambda_{kA}=1.71 \mu m$ und $\Lambda_{kB}=3.88 \mu m$ (zur Definition der Λ_k siehe Tabelle 2.1), wobei die Sollwerte $2 \mu m$ und $4 \mu m$ betragen. Im allgemeinen gilt, dass man die Korrelationslänge einer fiktiv generierten Höhensequenz nur ungenauer einstellen kann, als die Standardabweichung.

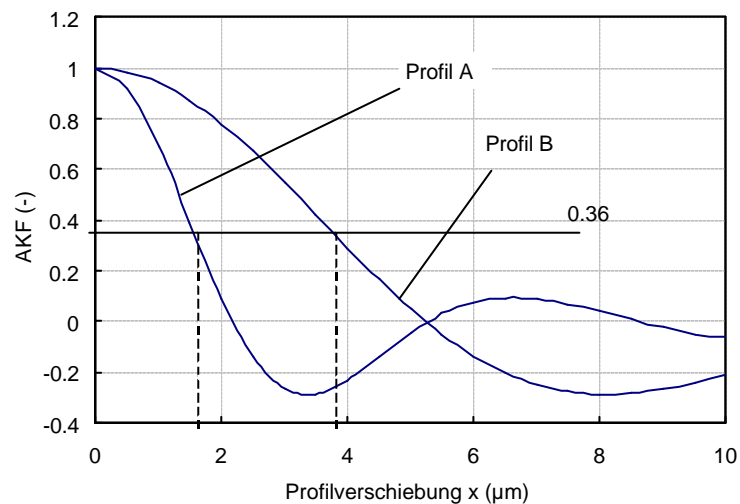


Abbildung 7.5 Prüfen der Korrelationslängen von Profilen A und B

7.3. Rechnerische Realisierung des Algorithmus

Zur Realisierung des Algorithmus nehmen wir im ersten Schritt eine einfache Anordnung an. Das Oberflächenprofil liege waagrecht (Abbildung 7.6 - die Abbildung 7.1 wird um 90° nach links umgedreht). Nun rechnen wir neben gegebenem Einfall die komplexen Amplituden entlang einer Koordinate in den Punkten eines Schirmes aus, der parallel zu Oberfläche in einem Abstand S steht. Wegen der Eindeutigkeit und der Durchschaubarkeit wird jede geometrische Größe nach einem einheitlichen Koordinatensystem (siehe Abbildung 7.6) definiert.

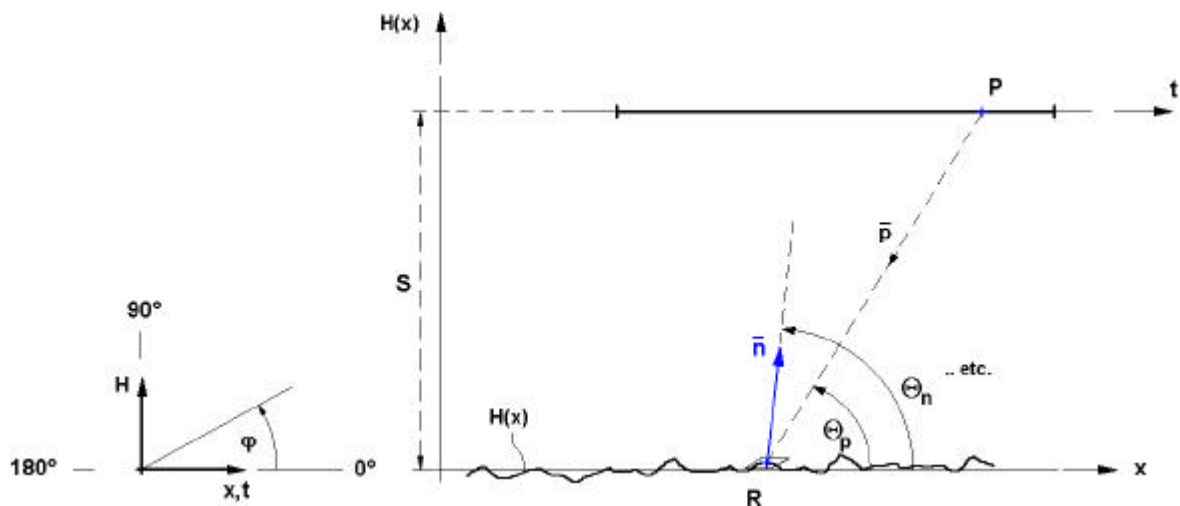


Abbildung 7.6 Geometrische Anordnung zur rechnerischen Realisierung der Kirchhoffschen Beugungstheorie

Die Koordinatenachse der Oberflächenpunkten sei x , das beliebige Oberflächenprofil wird durch die diskrete Funktion $H(x)$ dargestellt. Die Koordinatenachse der Schirmpunkten ist t , die sich unabhängig von x verändert. Jeder Winkel wird von den Achsen x, t , entgegen dem Uhrzeigersinn gemessen. Diese Winkeldefinition ist rechnerisch vorteilhaft, weil dadurch die Richtungswinkel der einzelnen Vektoren ($\Theta_n, \Theta_p, \Theta_r$ etc.) sich für gegebene Koordinaten x und t relativ schnell und einfach bestimmen lassen. Der Richtungswinkel des Normalenvektors wird aus dem Derivat der Oberfläche berechnet und der Reflexions-Richtungswinkel ist auch unkompliziert auszudrücken.

$$\Theta_n = 90 + \arctg\left(\frac{dH(x)}{dx}\right) = 90 + \arctg\left(\frac{H(x + \Delta x) - H(x)}{\Delta x}\right) \quad (7.3)$$

 Θ_q = Richtungswinkel des Einfalls, vordefiniert

$$\Theta_p = \arctg\left(\frac{S - H(x)}{t - x}\right) \quad (7.4)$$

$$\Theta_r = 2\Theta_n - \Theta_a \quad (7.5)$$

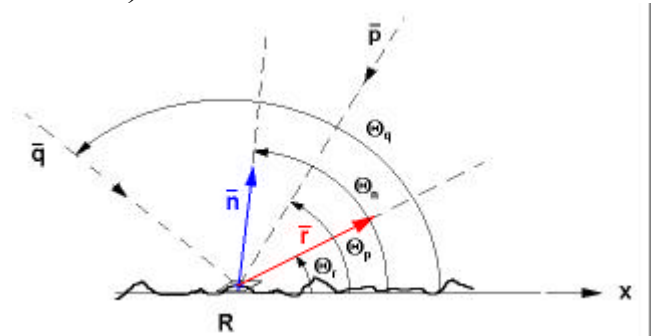
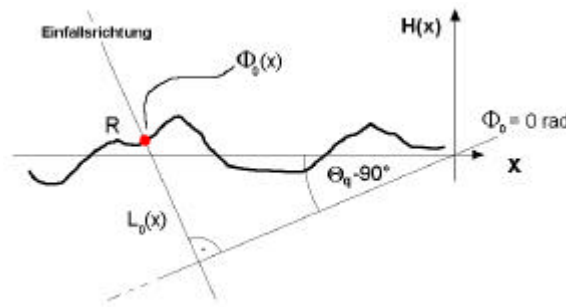


Abbildung 7.7 Definition von Richtungswinkeln

Damit können die für den Neigungsfaktor nötigen lokalen Winkel Θ_e und Θ_s aus den Richtungswinkeln berechnet werden: $\Theta_e = |\Theta_q - \Theta_r|$ und $\Theta_s = |\Theta_p - \Theta_r|$.

Wird für die Beleuchtung eine parallele Wellenfront vorausgesetzt, dann hat der Vektor \vec{q} in jedem Oberflächenpunkt denselben Richtungswinkel und die Quellenpunkten Q liegen auch einer Linie entlang, senkrecht zum Vektor \vec{q} . Dadurch lassen sich die Phasenzustände der Wellenfront in den Oberflächenpunkten eindeutig bestimmen: sei dies als Anfangsphase Φ_0 bezeichnet, die sich in der Koordinatenrichtung x verändert: $\Phi_0(x)$. Nimmt man an, dass der Nullpunkt des Koordinatensystems eben in die Wellenfront $\Phi_0=0^\circ$ fällt (Abbildung 7.8), so sind die Anfangsphasen wie folgt auszudrücken:



$$\begin{aligned}\Phi_0(x) &= kL_0(x) = \\ &= \frac{2p}{I}(x \sin(\Theta_q - 90) - H(x) \cos(\Theta_q - 90))\end{aligned}\quad (7.6)$$

Abbildung 7.8 Berechnung der Phase in den Oberflächenpunkten

Das heißt, die Belichtung und die Profillinie werden zusammen als eine "leuchtende Oberfläche" angesehen, in deren Punkten die Phasenzustände und die Reflexionsrichtungen bekannt sind. Dies bringt keine Vernachlässigung, vereinfacht aber wesentlich die Berechnung, da das Beugungsintegral sich nun in der folgenden Form schreiben lässt:

$$A(t) = \frac{1}{iI} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{e^{i(k|\vec{p}| + \Phi_0(x))}}{|\vec{p}|} \cdot N(x) dx \quad (7.7)$$

worin $N(x)$ der zur Koordinate x gehörige Neigungsfaktor ist. Dabei bezeichnet $|\vec{p}|$ die Länge des Vektors \vec{p} , d.h. den Abstand zwischen den Oberflächen- und Schirmpunkten R und P:

$$|\vec{p}| = \sqrt{(S - H(x))^2 + (x - t)^2} \quad (7.8)$$

Aus den komplexen Amplituden können wir hiernach die Intensitäten als Quadrat des Absolutwertes von Amplituden berechnen: $I(t) = A(t)A^*(t) = |A(t)|^2$. Als Endergebnis werden die sog. Streukoeffizienten angenommen, die sich durch Normierung der Intensitätsverteilung auf die 100 %-Gesamtleistung (Linienfläche) berechnen.

Da der Messaufbau die Probenoberflächen mit einem fokussierten Laserbündel beleuchtet, taucht die Frage auf, wie man die eventuelle Konvergenz der Wellenfront bei den Berechnungen in Betracht ziehen kann. Der Einfluss eines konvergenten Einfallsbündels lässt sich in drei Punkten zusammenfassen:

- kleinere Spotgröße, kleinerer Integrationsbereich
- veränderlicher Einfallswinkel entlang der Koordinate x

- gekrümmte Wellenfront in der Beleuchtung

Der erste Punkt benötigt keine Korrektur, die diskrete Integration muss nur innerhalb der kleineren Spotgröße des fokussierten Bündels durchgeführt werden.

Dem kontrahierenden Strahldurchmesser entsprechend wird die Einfall-Richtungswinkel Θ_q als kein Festwert betrachtet, sondern in Abhängigkeit der Koordinate x verändert. Dies veranschaulicht die folgende Abbildung 7.9/a.

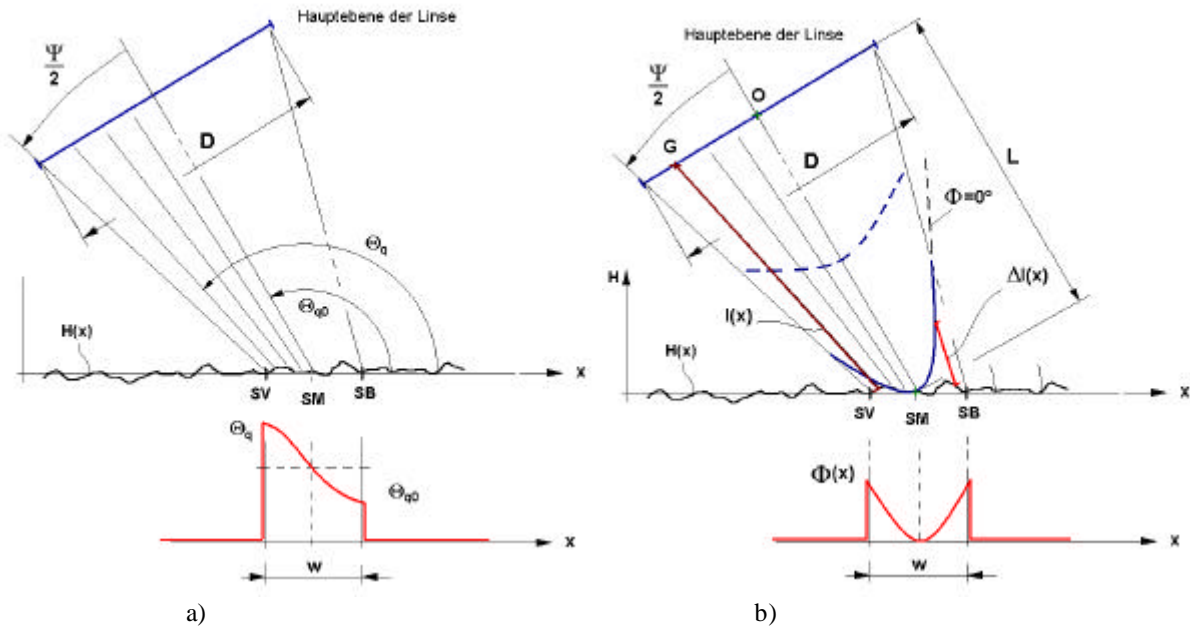


Abbildung 7.9 Einfluss der Strahlkonvergenz a) auf den Einfallswinkel b) auf die Phase

Sei der Einfall-Richtungswinkel der Mittellinie des gegebenen Strahlbündels mit Θ_{q0} und der Öffnungswinkel der Konvergenz mit Ψ bezeichnet. Die x -Koordinate des auf Oberfläche projizierten Spots sei SM, die Koordinaten der Randpunkte sind SV und SB. Demnach lässt sich der Einfall-Richtungswinkel in Funktion der x -Koordinate mit der Formel berechnen:

$$\Theta_q(x) = \Theta_{q0} + \arctg \left(\frac{(SM - x) \tg \left(\frac{\Psi}{2} \right)}{SM - SV} \right) \quad (7.9)$$

Samt den Einfall-Richtungswinkeln verändern sich auch die Reflexions-Richtungswinkel und dementsprechend die lokalen Einfall- und Streuwinkel.

Beim konvergenten Bündel ist es wegen der gekrümmten Wellenfront nicht mehr möglich, die Anfangsphasen mit der Formel (7.6) zu bestimmen. Betrachten wir nun die Konvergenz hervorrufoende Linse als eine theoretische Dünne Linse, deren Hauptebene von der Oberfläche in einem bekannten - oder rechenbaren - Abstand liegt. Nimmt man die Nullphase-Wellenfront in die Mitte des Spots auf, so wären die Anfangsphasen in den Oberflächenpunkten aus den Δl -Abständen zu berechnen (Abbildung 7.9/b). Es ist aber rechnertechnisch einfacher, die Nullphase-Front in die Hauptebene der Linse zu legen und die Anfangsphasen aus den einzelnen Hauptebene-Oberflächenpunkt Strecken $l(x)$ zu berechnen.

Da die Streckenlängen $l(x)$ sich exakt nicht ausdrücken lassen, es ist zweckmäßig, mit den Punktkoordinaten zu arbeiten:

Abstand der Hauptebene von der Oberfläche:

$$L = \frac{D - w}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \quad (7.10)$$

Die Koordinaten des Punktes "G":

$$\begin{pmatrix} G_x \\ G_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} SM \\ 0 \end{pmatrix} + \overline{SMO} + \overline{OG} \quad (7.11)$$

Die Länge der Strecken $l(x)$ und die Anfangsphase: $l(x) = \sqrt{(x - G_x)^2 + (G_y - H(x))^2}$ (7.12)

$$\Phi_0(x) = k \cdot l(x) = \frac{2p}{l} l(x) \quad (7.13)$$

Obwohl diese Rechenprozess umständlich ist (vor allem die Berechnung von Vektoren \overline{SMO} und \overline{OG}), die Anfangsphasen müssen aber nur einmal, vor dem Lauf der Rechenschleife des Beugungsintegrals bestimmt werden. Es ist zu bemerken, dass das Streufeld bei Simulation mit einer konvergenten Beleuchtung vor allem durch die ersten beiden Effekte (kleine Spotgröße, veränderliche Einfallswinkel) beeinflusst wird.

Eine wichtige optische Eigenschaft der Materialien ist die Reflektivität, deren Betrag von den Einfallsrichtungen abhängt. Diesen Zusammenhang beschreiben die bekannten Fresnel-Gesetze, die das Reflexionsvermögen aus der Brechzahl des Materials angibt. Diagramme 7.10 stellen das Reflexionsvermögen des Siliziums in Funktion des Einfallswinkels sowohl für komplexe Amplitude als auch für Intensität dar (für Metalle erhält man ähnliche Kennlinien). Im Falle unpolarisiertes oder zirkular polarisiertes Lichtes ist das Reflexionsvermögen beinahe Konstant (für Si beträgt ca. 0.3), es weicht nur bei höheren Einfallswinkeln ($\Theta_e > 80^\circ$) davon ab. Dies würde praktisch für jeden Intensitätswert eine Multiplikation mit einem Festwert bedeuten, die bei Normierung der Streukoeffizienten ohnehin eliminiert wird. Der Einfluss der Einfallsrichtung auf das Reflexionsvermögen kann daher in erster Annäherung vernachlässigt werden.

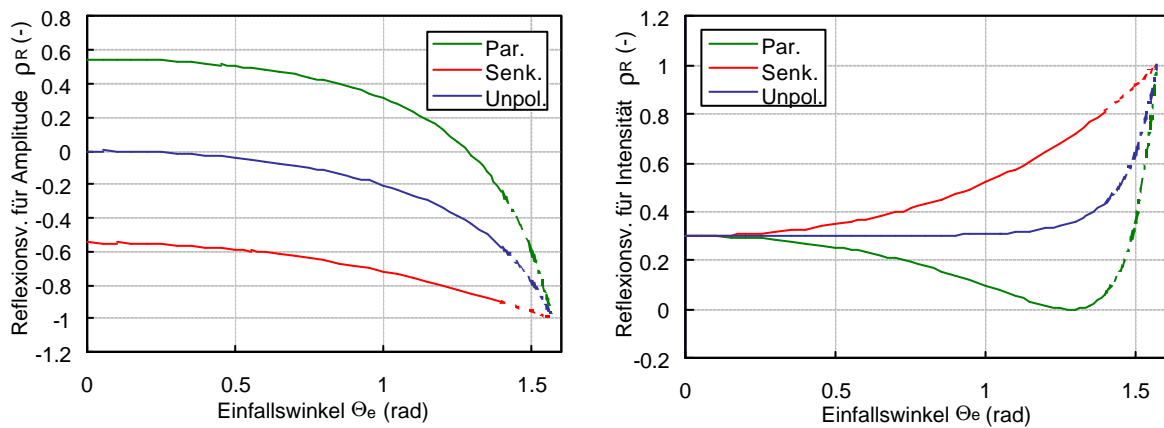


Abbildung 7.10 Reflexionsvermögen in Abhängigkeit des Einfallswinkels für Silizium

Schließlich ist es zu bemerken, dass die Gültigkeit der Kirchhoffschen Näherung nicht eindeutig ist, ihre Anwendbarkeit ist mit Kriterien verbunden. Es ist einzusehen, dass die Endlichkeit des Integrationsbereiches die Rechnungsgenauigkeit beschränkt und in extremen

Fällen den sog. Edge-Effekt [45] hervorrufen kann. Um dies zu vermeiden, muss die Simulationsanordnung einerseits die Bedingung $2L_x/\lambda \gg 1$ (L_x -Integrationslänge) erfüllen, andererseits soll das Oberflächenprofil in jedem Punkt endlichen Krümmungsradius besitzen [44,45]. In den nachstehenden Berechnungen können diese Kriterien wegen den entsprechend gewählten geometrischen Größen und den geglätteten Profilformen als erfüllt angesehen werden.

Einen anderen Effekt stellt die endliche Anzahl von Berechnungspunkten dar. In den Oberflächenpunkten wird das Profil durch seine Tangentialebene ersetzt und die Profilstrecken zwischen den Abtastpunkten werden vernachlässigt. Man nimmt an, dass die Lichtwellen auch in diesen Bereichen von der Tangentialebene gestreut werden. Bass [6] und Ogilvy [51] formulierten hierfür das Kriterium: die in Einfallsrichtung genommene Abweichung zwischen Tangentialebene und Profillinie soll viel kleiner als die Wellenzahl sein. Mehrere Autoren haben daraus Bedingungen abgeleitet, von denen die Brekhovkikh-Kriterium generell bekannt ist:

$$\frac{\Lambda_k^2}{2pI\Delta x} \cos \Theta_e \gg 1 \quad (7.14)$$

wobei Δx die Schrittweite der äquidistanten Oberflächenaufteilung bezeichnet. Aus der Formel ist es abzulesen, dass die Gültigkeitsbedingungen sich mit Abnahme der Korrelationslänge und mit Zunahme der Schrittweite und der Einfallswinkel verschlechtern. Bei anderen Autoren (z.B. Dainty [11]) erscheint dieses Kriterium in der Form $\Lambda_k/R_q \gg 1$ und $\Theta_e < 45^\circ$. Bei praktischen Anwendungen - und in den folgenden vorzustellenden Simulationen - spielen die senkrechtnahe Einfälle eine Rolle, somit die Beschränkungen für Θ_e leicht einzuhalten sind.

Die Genauigkeit der Kirchhoffschen Berechnung wird auch durch die Einteilung der Abtastpunkten beeinflusst. Bei dem beschriebenen Algorithmus werden die Berechnungspunkte entlang der Oberflächen-Koordinate in äquidistanten Schritten festgestellt: dies ist zwar rechnerisch praktisch, führt aber zu einer ungleichmäßigen Aufteilung in der Wellenfront (siehe Abbildung 7.11/a). Einige Autoren [32] teilen dagegen die Apertur zu gleichen Strecken auf und die Abtastpunkte werden durch den Schnitt der parallelen Bündel mit der Profillinie definiert (Abbildung 7.11/b). Ein Vorteil dabei ist, dass die abgeschatteten Profilstrecken dabei außer Acht gelassen werden. Die realisierte Abtastpunkt-Definition kann bei höheren Einfallswinkeln wieder Ungenauigkeiten verursachen.

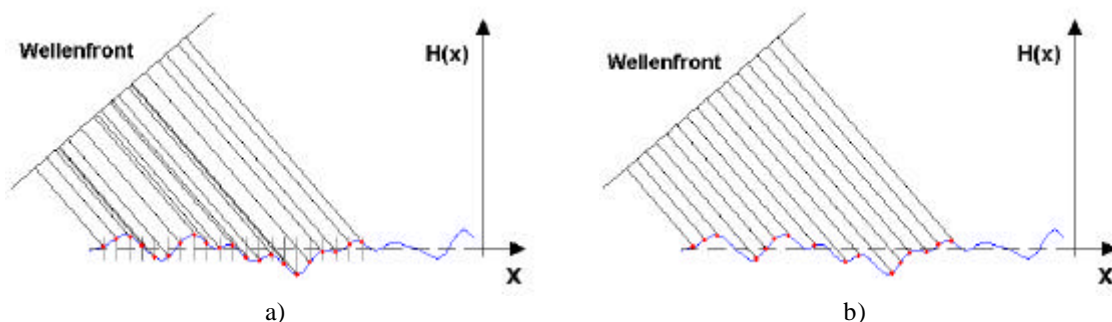


Abbildung 7.11 Aufteilung der Wellenfront durch äquidistante Abstände a) in Richtung der Oberflächenkoordinate b) senkrecht zur Einfallsrichtung

7.4. Die Simulationssoftware. Übereinstimmung mit den traditionellen Beugungsformeln

Abbildungen 7.12 zeigen die durch die Simulationssoftware verwendeten Anordnungen für direkte (störungsfreie) Reflexion. Die zur Berechnung unbedingt erforderlichen Messgrößen sind in der Abbildung mit grün bezeichnet, die das geometrische Verhältnis der Anordnung zugleich eindeutig feststellen.

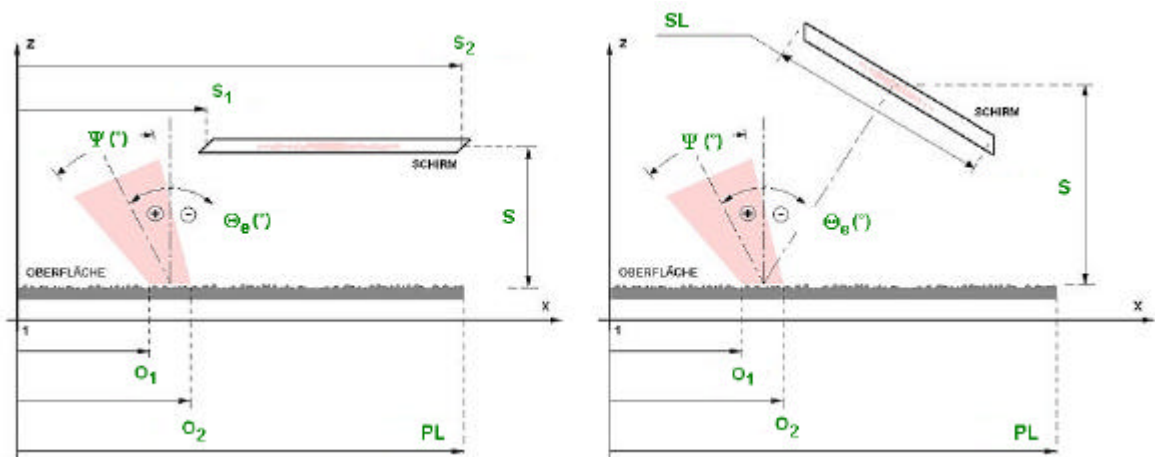


Abbildung 7.12 Mögliche Anordnungen und die anzugebenden geometrischen Größen

Sowohl die Länge des Oberflächenprofils (PL) als auch die Koordinaten des ausgeleuchteten Spots (O_1 , O_2) und des Schirmes (S_1 , S_2) sind in demselben Koordinatensystem, ausgehend vom linken Nullpunkt der Anordnung, anzugeben.

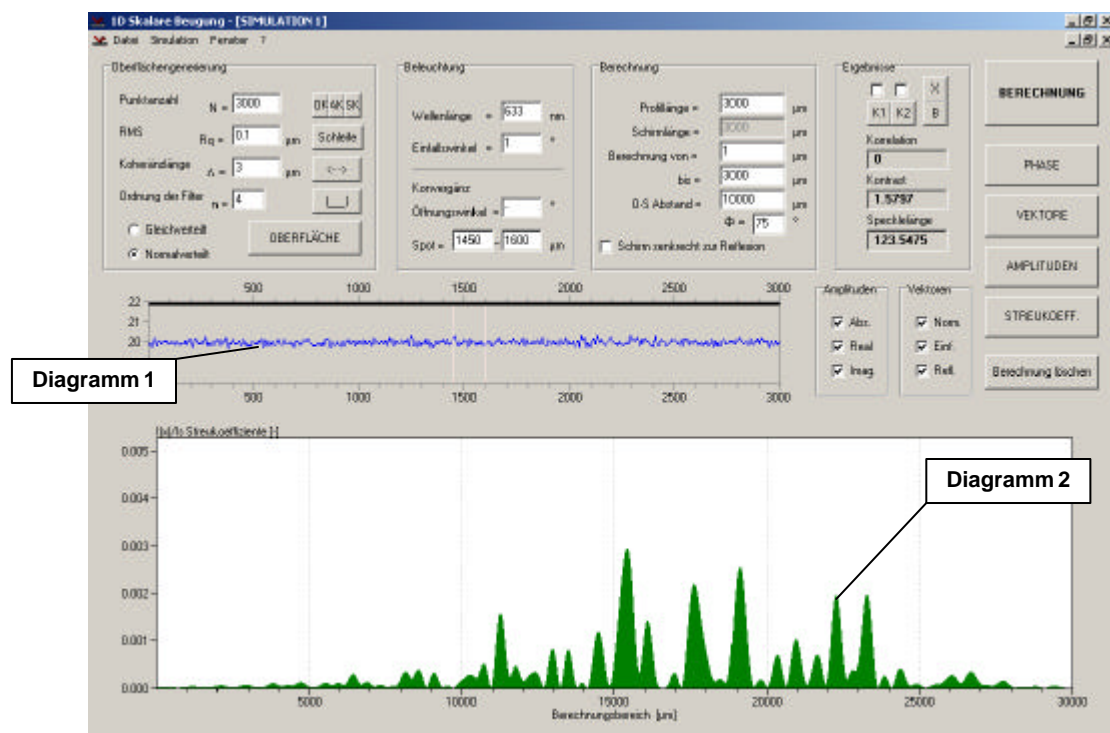


Abbildung 7.13 Das Simulationsprogramm

Das Streufeld kann entweder in einer zur Oberfläche parallelen, oder in einer zur jeweiligen Reflexionsrichtung senkrechten Ebene berechnet werden (das Letztere spielt bei der Simulation der angularen Korrelation eine große Rolle). Der Einfallswinkel und der Öffnungswinkel der eventuellen Konvergenz sind nach der konventionellen Definition (Abbildung 7.12) anzugeben.

Das Hauptfenster der Simulationssoftware ist in Abbildung 7.13 angezeigt. In den drei Paneelen über den Diagrammen müssen die Parameter der Oberfläche, der Beleuchtung und der Berechnung angegeben werden. Weitere Dialogfenster dienen für die Anzeige von numerischen Ergebnissen sowie für die Einstellung der graphischen Darstellung. Die anzugebenden geometrischen Größen, die rechenbaren Daten und darstellbaren Diagramme sind in den Tabellen 7.1 zusammengefasst.

| Eingangsdaten | | Messeinheit | Berechnete Daten | |
|-----------------------------|---|---------------|------------------|---|
| Oberflächen- generierung | Profillänge: PL | μm | Numm. Daten | Speckle-Kontrast |
| | Anzahl der Berechnungspunkte | - | | Mittlerer Speckle-Korndurchmesser |
| | R _q - Rauigkeit | μm | Diagramme | |
| | Korrelationslänge | μm | | |
| | Ordnung der Filter | - | | |
| Beleuchtung | Verteilung der Profilhöhen | gleich/normal | Diag. 1 | Rauigkeitsprofil |
| | Wellenlänge | nm | | Intensitätsverteilung im Beleuchtungsspot |
| | Einfallswinkel: Θ _e | ° | | Spot-Position (rote Linien) |
| | Intensitätsverteilung im Beleuchtungsspot | kasten/normal | Diag. 2 | Schirm-Position (dicke schwarze Linie) |
| | Konvergenz | ja/nein | | Anfangsphase an der Oberfläche |
| Berechnung | Öffnungswinkel: Ψ | ° | | Richtungswinkel der Normal-, Einfalls- und Reflexionsvektoren an der Oberfläche |
| | Strahldurchmesser | mm | | Komplexe Amplituden am Schirm (Real-, Imaginärteilen, Absolutwerte) |
| | Spotkoordinaten: O ₁ , O ₂ | μm | | Normierte Streukoeffizienten am Schirm |
| | Schirmlänge: SL | μm | | |
| | Schirmskoordinaten: S ₁ , S ₂ | μm | | |
| | Oberfläche-Schirm Abstand | μm | | |
| | Schirmstellung | par./senkr. | | |

Tabelle 7.1 Eingangsparameter der Simulationssoftware und die rechenbaren Daten

Zu den numerischen Ergebnissen gehört der mittlere Speckle-Durchmesser des berechneten Streufeldes (im eindimensionalen Fall ist dies ein Längenbetrag, sog. Specklelänge), den die Software nach der Formel

$$L_{SP} = \frac{2ps_{SF}}{\sqrt{\frac{1}{l} \int_l \left(\frac{dh(x)}{dx} \right)^2 dx}} \quad (7.15)$$

berechnet [48,69]. Dabei stellt σ_{SP} die Standardabweichung der Streukoeffizienten im Specklemuster dar.

Um die richtige Funktion des programmierten Algorithmus zu testen, werden die in der Specklevertellung erscheinenden durchschnittlichen Korndurchmesser mit den theoretischen Licht-Ausbreitungen verglichen:

$$D_{the} = 1.22 \frac{L_{os}}{D_s} \lambda \quad (7.16)$$

In dieser vorläufigen Untersuchung ist die Form des Oberflächenprofils ohne Bedeutung, es muss aber eine ausreichend hohe Rauigkeit besitzen, damit voll ausgebildete Specklemuster an dem Schirm entstehen (zur Berechnung wurde ein Profil mit $R_q=0.3 \mu m$ Rauigkeit und mit $\Lambda_k=5 \mu m$ Korrelationslänge generiert). In den nächsten Diagrammen sind die mit Formel (7.16) berechneten Korndurchmesser (D_{the}) mit durchgezogenen Linien und die Simulationsergebnisse (D_{sim}) mit diskreten Punkten dargestellt.

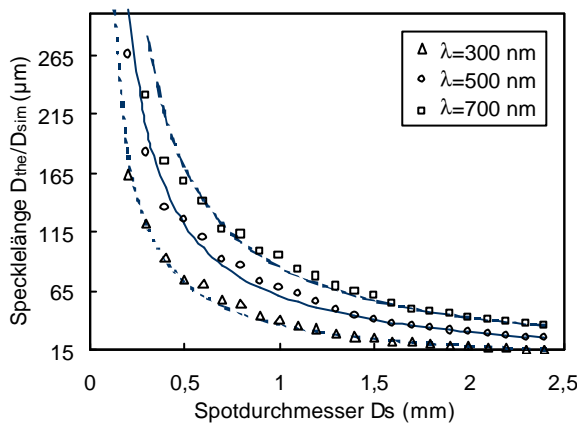


Abbildung 7.14 Vergleich der theoretischen (D_{the}) und der simulierten (D_{sim}) Specklelänge in Abhängigkeit des Spotdurchmessers (D_s)

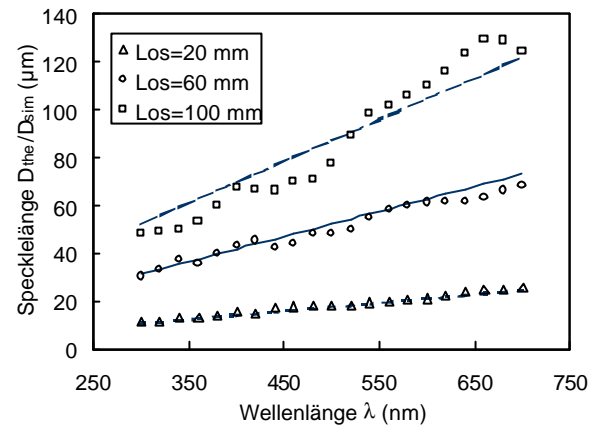


Abbildung 7.15 Vergleich der theoretischen (D_{the}) und der simulierten (D_{sim}) Specklelänge in Abhängigkeit der Wellenlänge (λ)

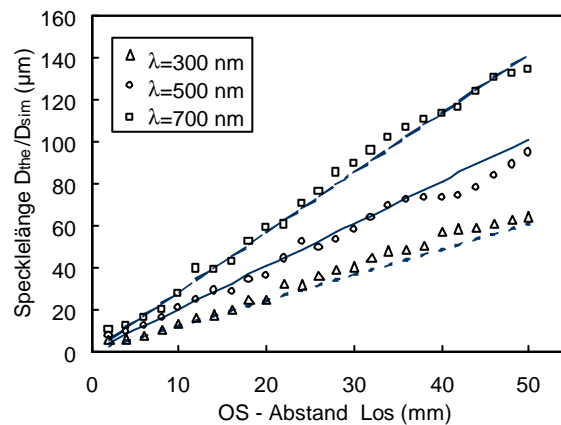


Abbildung 7.16 Vergleich der theoretischen (D_{the}) und der simulierten (D_{sim}) Specklelänge in Abhängigkeit des Objekt-Schirm Abstandes (L_{OS})

Die theoretischen und die simulierten Ergebnisse stimmen gut überein, alleine bei der Wellenlängenänderung und für größere Schirmabstände treten erhebliche Abweichungen auf.

7.5. Simulationsergebnisse für die störungsfreie Reflexion

Obwohl die im vorigen Kapitel beschriebene Beugungsrechnung für das Testen des realisierten Algorithmus entwickelt wurde, können damit bereits die praktischen Vermessungen bei kleineren Strukturwand-Neigungswinkeln simuliert werden. Dafür wird die Anordnung gemäß Abbildung 7.17 verwendet, wo die generierte Oberfläche und der Schirm zueinander parallel liegen. Die geometrischen Größen werden der Abbildung 7.17 entsprechend definiert. Der Schirm steht der Wirklichkeit entsprechend in einem Abstand von $S=100\text{ mm}$ über der Oberfläche; der Einfallswinkel des konvergentem Bündels beträgt $\Theta_s=-20^\circ$. Es wird nur eine Strecke O_1 - O_2 vom fiktiven Profil ausgenutzt, die die Seitenwand der Mikrostruktur repräsentiert (diese Anordnung weicht nur soweit von der realen Konstruktion ab, dass beim Messaufbau der Schirm wegen der Kamerastellung senkrecht steht).

Aus dem Austrittsdurchmesser des verwendeten Gaslasers ($D_{AT}=0.81\text{ mm}$) und aus der Linsenbrennweite ($f=30\text{ mm}$) berechnet sich der Öffnungswinkel der Konvergenz zu $\Psi=1.98^\circ$ (für die Simulation nehmen wir abgerundete Beträge auf: $D_{Strahl}=1\text{ mm}$ und $\Psi=2^\circ$).

| Daten | Wert |
|--|----------------------|
| R_q | 0-0.5 μm |
| L_k | 5-15 μm |
| PL | 80100 μm |
| Anzahl der B.punkte | 8010000 |
| Verteilung der Profilhöhen | normal |
| l | 633 nm |
| Q_e | -20° |
| O_1 | 80000 μm |
| O_2 | 80050 μm |
| Y | 2° |
| Intensitätsverteilung im Beleuchtungspot | normal |
| Strahldurchmesser | 1 mm |
| S_1 | 1 μm |
| S_2 | 80000 μm |
| S | 100000 μm |
| Schirmstellung | parallel |

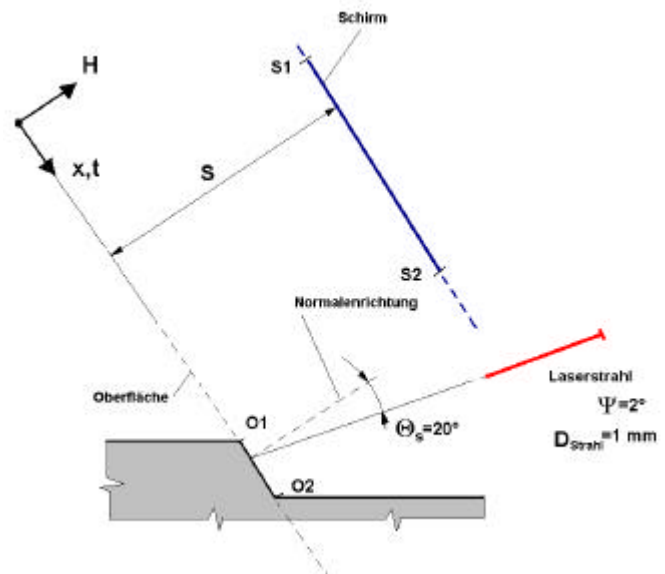


Tabelle 7.2 Parameter-Einstellungen für die Anordnung in Abb. 7.17

Abbildung 7.17 Geometrische Anordnung zur Untersuchung der störungsfreien Reflexion an einer Strukturwand

Die eingestellten geometrischen Größen und die Beleuchtung-/Berechnungsparameter sind in der Tabelle 7.2 zusammengefasst. Mit dieser Anordnung wird im ersten Schritt der Kontrast des Specklemusters in Abhängigkeit der R_q -Rauigkeit von Oberfläche O_1 - O_2 modelliert.

Es bietet sich zugleich eine einfache Möglichkeit an, die angular und spektrale Korrelationen zu modellieren, da der Einfallswinkel und die Wellenlänge in der Simulationssoftware Eingangsparameter sind. Die Ortskorrelation kann mit einer Oberflächenverschiebung in der x-Richtung modelliert werden (die Verschiebungsrichtung ist nicht real: bei Vermessungen wurden die Proben senkrecht zu den Richtungen x,t und H bewegt. Nimmt man Anisotropie

an, so spielt diese Abweichung keine Rolle). In Kenntnis der Streukoeffizienten lässt sich die Auto-Korrelationsfunktion des Streufeldes bestimmen, wodurch die experimentalen Ergebnisse des Kapitels 5.4 nachgewiesen werden können.

Für jede Simulationsanalyse wurden ca. 40-50 Profilformen generiert. Zwecks Durchschaubarkeit werden im folgenden die Ergebnisse nur für sechs ausgewählte Oberflächen dargestellt. Ihre Rauigkeitswerte und die Beträge der im Kapitel 7.3. vorgestellten Kriteriums-Ausdrücke sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

| Profil | R _q (μm) | Gültigkeitskriterien (siehe Kap. 7.3.) | | | | | | | |
|--------|---------------------|--|---|-------|-------|--------------------------------|-----|-----|----------------|
| | | 2L _x /λ | $\frac{\Lambda_k^2}{2pl\Delta x}\cos\Theta_e$ | | | Λ _k /R _q | | | Θ _e |
| | | für Korrelationslängen (μm) | | | | | | | |
| | | - | 5 | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | - |
| P1 | 0,02 | 181,8 | 6,79 | 27,19 | 61,18 | 250 | 500 | 750 | -20° |
| P2 | 0,1 | | | | | 50 | 100 | 150 | |
| P3 | 0,5 | | | | | 10 | 20 | 30 | |
| P4 | 1 | | | | | 5 | 10 | 15 | |
| P5 | 2 | | | | | 2,5 | 5 | 7,5 | |
| P6 | 3 | | | | | 1,6 | 3,3 | 5 | |

Tabelle 7.3 Gültigkeitskriterien für die generierten Rauigkeitsprofile

Die berechneten Gültigkeitskriterien für die Kirchhoffschen Näherung werden in jedem Fall erfüllt. Das Verhältnis Λ_k/R_q kann bei höheren Rauigkeiten ($R_q > 3$ μm) die Eins annähern, diese Profilformen liegen aber außerhalb des mikrotechnisch relevanten Bereiches.

7.5.1. Speckle-Kontrast

Die Einflüsse der Oberflächeneigenschaften auf Speckle-Kontrast wurden in zwei Schritten untersucht. Zum einen wurde die Rauigkeitstiefe ab $R_q=0 \mu\text{m}$ bis $R_q=0.5 \mu\text{m}$ in äquidistanten Schritten von $\Delta R_q=0.01 \mu\text{m}$ (bei fester Korrelationslänge $\Lambda_k=10 \mu\text{m}$) verändert. Diese Simulation wurde für drei Wellenlängen $\lambda=300, 500$, und 700 nm durchgeführt. In Diagrammen 7.18 sind die bei $\lambda=500 \text{ nm}$ berechneten Streulichtverteilungen für vier unterschiedliche R_q -Rauigkeiten dargestellt.

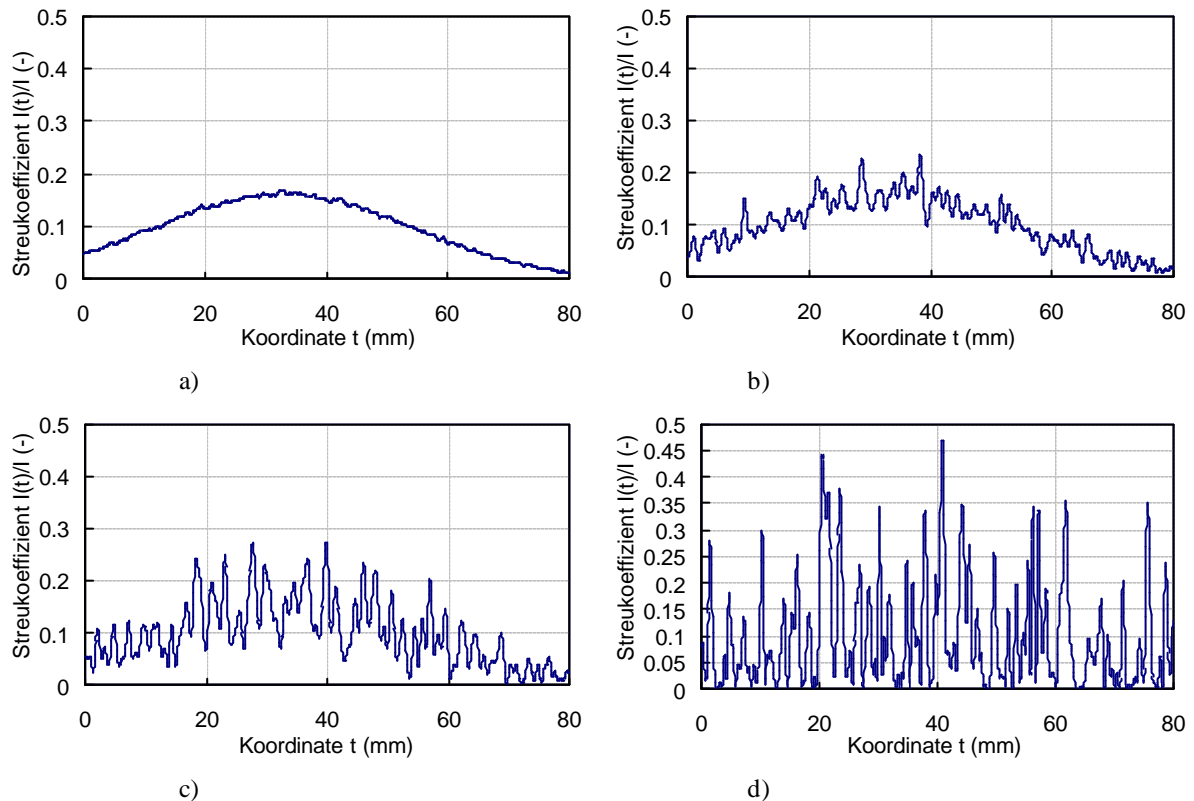


Abbildung 7.18 Streulichtverteilungen für unterschiedliche Rauigkeiten: a) $R_q=0.01 \mu\text{m}$, $K=0.35$
b) $R_q=0.05 \mu\text{m}$; $K=0.42$ c) $R_q=0.1 \mu\text{m}$, $K=0.79$ d) $R_q=0.3 \mu\text{m}$, $K=1$

Die mit Zunahme der Rauigkeit immer stärkende Modulation lässt sich in den Verteilungen gut erkennen. Vor allem bei kleinerer Rauigkeit ist ersichtlich, dass die Intensitäten über der Beobachtungsebene nicht gleichmäßig verteilt sind (weisen in Mitte des Schirmes ein Maximum auf), was auf die Spot-Beleuchtung zurückzuführen ist.

Aufgrund dieses Effektes kann der Kontrast auch im Falle einer absolut glatten Oberfläche den Nullwert nie erreichen. Dies spiegelt sich dann im Seitenwandrauhigkeits-Kontrast Diagramm 7.19 wieder, wobei die Kurven statt dem Nullpunkt bei einem Funktionswert von ca. $K \approx 0.35$ beginnen. Die Steilheit der Kurven nimmt mit Zunahme der Wellenlänge ab, der theoretischer Anwendungsbereich verbreitert sich. Einige Literaturquellen [57,70] geben eine Grenze von $R_q < \lambda/4$ als Anwendungsbedingung an, die sich in dem obigen Diagramm als richtig erwiesen ($\lambda=300 \text{ nm}$? $R_{q\text{max}} \approx 0.075 \mu\text{m}$; $\lambda=500 \text{ nm}$? $R_{q\text{max}} \approx 0.125 \mu\text{m}$; $\lambda=700 \text{ nm}$? $R_{q\text{max}} \approx 0.150 \mu\text{m}$).

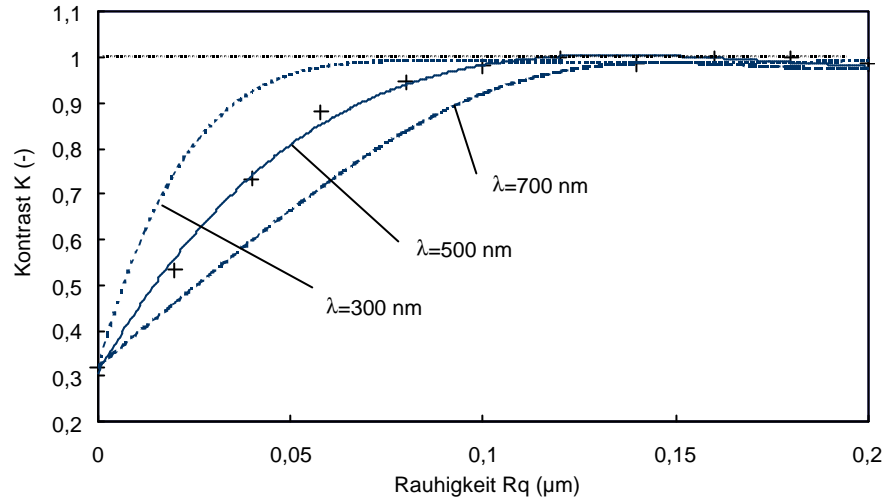


Abbildung 7.19 Der simulierte Speckle-Kontrast in Abhängigkeit der Rauigkeit für unterschiedliche Wellenlängen

Dies stimmt zwar mit den theoretischen Ergebnissen überein (Kapitel 3. Diagramm 3.5), die experimentellen Messungen wiesen aber auf einen breiteren veränderlichen Bereich hin (bei $\lambda=633 \text{ nm}$ $R_{q\text{max}} \approx 0.3\text{-}0.35 \text{ }\mu\text{m}$).

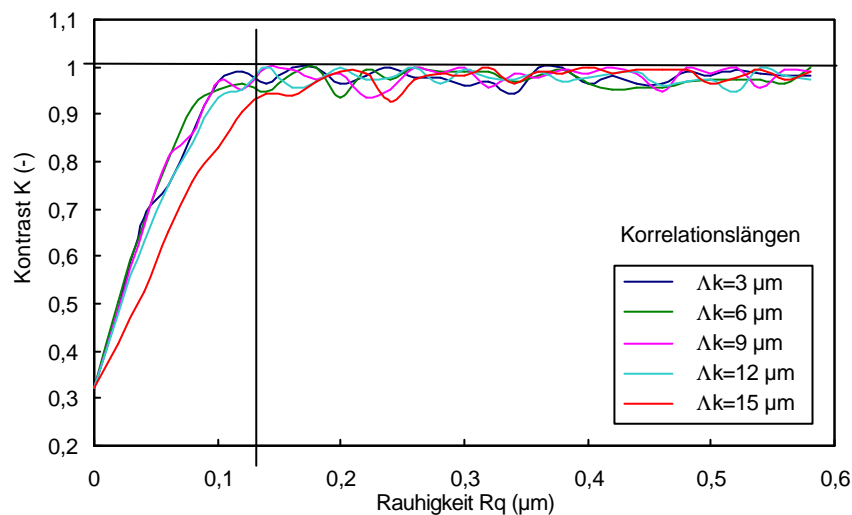


Abbildung 7.20 Der simulierte Speckle-Kontrast in Abhängigkeit der Rauigkeit für unterschiedliche Korrelationslängen

Diagramm 7.20 demonstriert den Kontrast der berechneten Streufelder in Abhängigkeit der Rauigkeit (neben einer festen Wellenlänge von $\lambda=500 \text{ nm}$), wobei die Profil-Korrelationslängen zwischen $\Delta k=3 \text{ }\mu\text{m}$ und $\Delta k=15 \text{ }\mu\text{m}$ geändert wurden. Da sich die Kurven decken, ist zu sagen, dass der Speckle-Kontrast hauptsächlich durch die Profiltiefe beeinflusst wird und nicht durch die Korrelationslänge (nur bei größeren Korrelationslängen $\Delta k > 12 \text{ }\mu\text{m}$ ist einige Steilheits-Abnahme zu entdecken). Diese Aussage ist deswegen wesentlich, weil man darauf aus den praktischen Resultaten nicht schließen kann.

7.5.2. Kreuz-Korrelationen

Zur Modellierung der Kreuz-Korrelationsmessungen wurden ebenfalls die Anordnung 7.17 und die in Tabelle 7.2 angegebenen Parameter eingesetzt. Für die angulare Korrelation wurde der Einfallswinkel von einem Grundwert $\Theta_e = -20$ ausgehend in beiden Richtungen in dem Bereich von $\Delta\varphi = 0..1^\circ$, in zehn Schritten verändert. Das Diagramm 7.21 stellt die Korrelationskoeffizienten zwischen der ersten Referenzverteilung und den mit verstellten Einfallswinkeln berechneten Streufeldern in Funktion der $\Delta\varphi$ Einfallswinkeländerung dar. Die fiktiven Oberflächenprofile wurden innerhalb des Rauheitsbereiches von $R_q = 0.1 \mu\text{m}$ in Schritten von $\Delta R_q = 0.05 \mu\text{m}$, und im Bereich $R_q = 1..5 \mu\text{m}$ in Schritten von $\Delta R_q = 0.2 \mu\text{m}$ generiert. Dadurch ergaben sich insgesamt 40 Simulationenpunkte. Die einzelnen Diagrammpunkte stellen einen Mittelwert der Ergebnissen von drei unabhängigen Modellierungen dar.

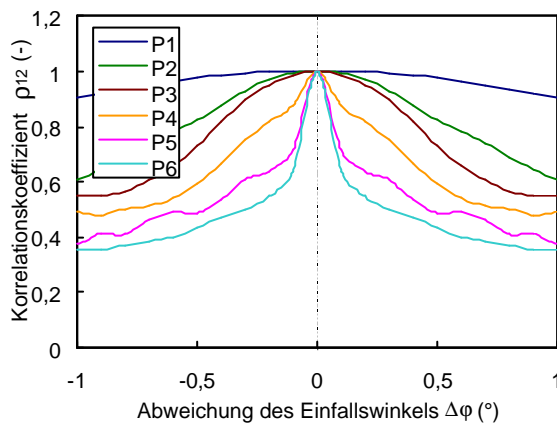


Abbildung 7.21 Angulare Kreuz-Korrelation in Abhängigkeit der $\Delta\varphi$

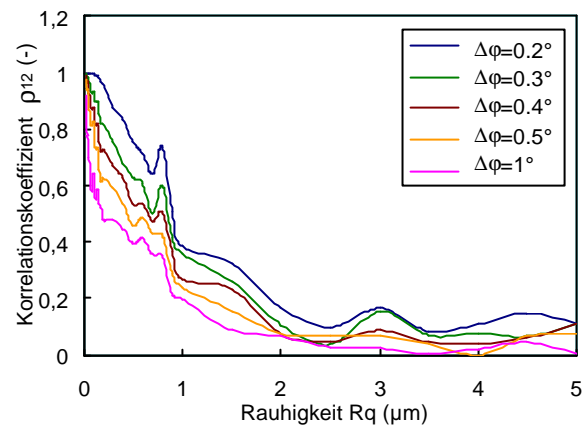


Abbildung 7.22 Angulare Kreuz-Korrelation in Abhängigkeit der Rauigkeit

Im Diagramm 7.22 sind die Korrelationskoeffizienten für bestimmte Winkelabweichungen als Funktion der Rauigkeit dargestellt. Es ist abzulesen, dass der theoretische Anwendungsbereich der angularen Korrelationsmethode viel breiter ist, als der bei den praktischen Vermessungen untersucht wurden: die R_q - ρ_{12} Kurven weisen eine signifikante Gradient bis zu $R_q = 2 \mu\text{m}$ auf.

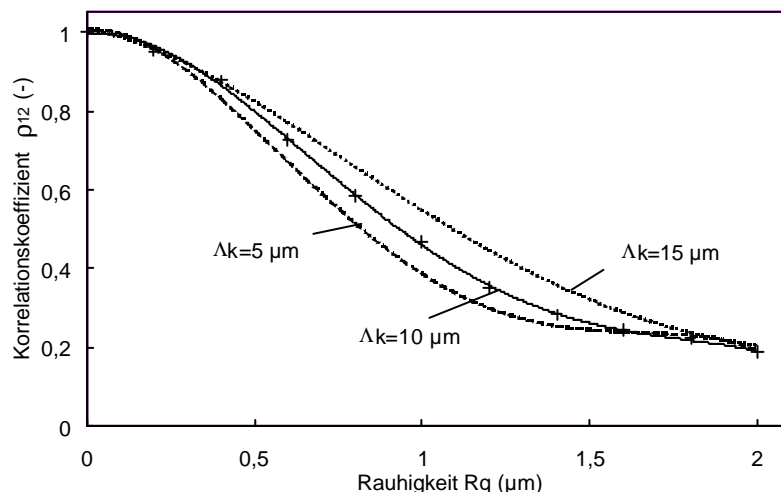


Abbildung 7.23 Einfluss der Korrelationslänge auf den angularen Korrelationskoeffizienten

Abbildung 7.23 zeigt drei gefittete Regressionskurven für $\Delta\varphi=0.4^\circ$, wobei die charakteristischen Korrelationslängen der generierten Oberflächen unterschiedlich sind. Die horizontale Rauheitskenngröße beeinflusst die Beziehung: bei niedrigen Korrelationslängen weisen die Koeffizienten eine schnellere Abnahme auf (siehe die gestrichelten Linien).

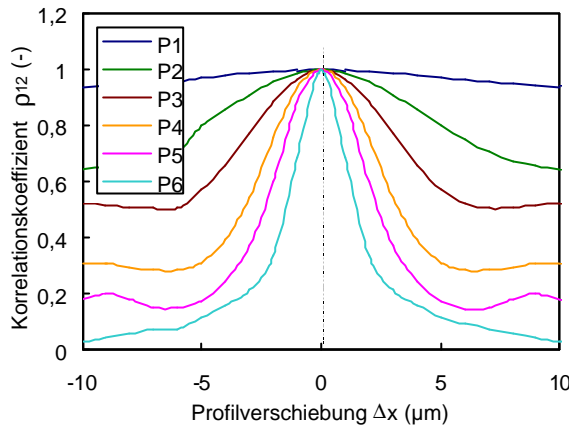


Abbildung 7.24 Örtliche Kreuz-Korrelation in Abhängigkeit der Δx

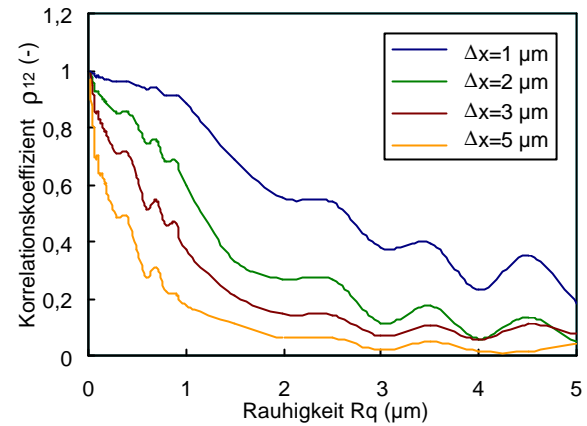


Abbildung 7.25 Örtliche Kreuz-Korrelation in Abhängigkeit der Rauigkeit

Bei Simulation der Ortskorrelation wurde dieselbe Rauigkeitsskala eingesetzt. Dabei wurde die die Seitenwand repräsentierende Profillinie von der Ausgangsposition ausgehend innerhalb eines Bereiches von $\Delta x=0..10 \mu\text{m}$ in beiden Richtungen verschoben. Die Ortskorrelationsergebnisse sind in Diagrammen 7.24 und 7.25 dargestellt. Aus dem Rauigkeits-Korrelation Diagramm ist es ersichtlich, dass der theoretische Messbereich der Methode mit entsprechender Probenverschiebung bis zu $R_q=3.4 \mu\text{m}$ auszuweiten ist. Mit Einsatz vom hohen Δx -Wert lässt sich jedoch eine große Steilheit erzielen, die bei Messung von kleinen Rauigkeiten von Vorteil sein kann.

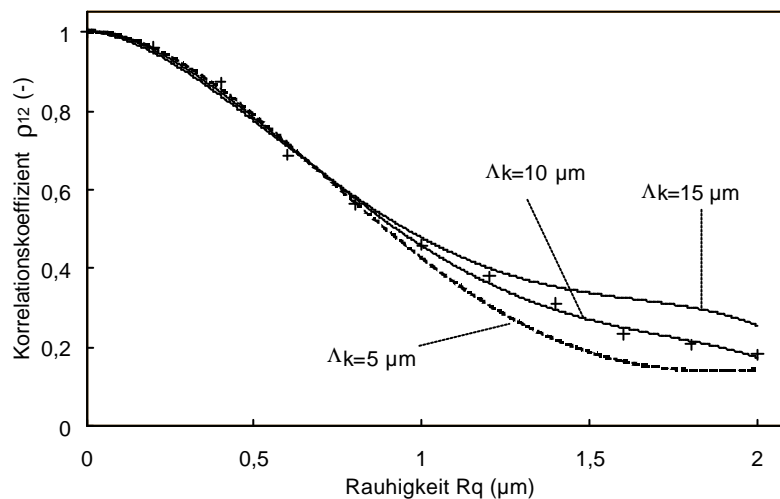


Abbildung 7.26 Einfluss der Korrelationslänge auf den örtlichen Korrelationskoeffizienten

Die Korrelationslänge des Rauigkeitsprofils übt einen ähnlichen Einfluss auf die Ortskorrelation wie bei der ASK auch: kürzere Korrelationslängen verursachen einen schnelleren Abfall und damit eine höhere Steilheit im R_q - ρ_{12} Diagramm.

Obwohl die spektrale Korrelation im Praxis nicht realisiert wurde, bietet die Verstellung der Wellenlänge die Möglichkeit an, auch dieses Verfahren relativ einfach zu modellieren. Die

mit skalarer Beugungstheorie berechneten Zusammenhänge für spektrale Korrelation sind in Diagrammen 7.27 und 7.28 gezeigt.

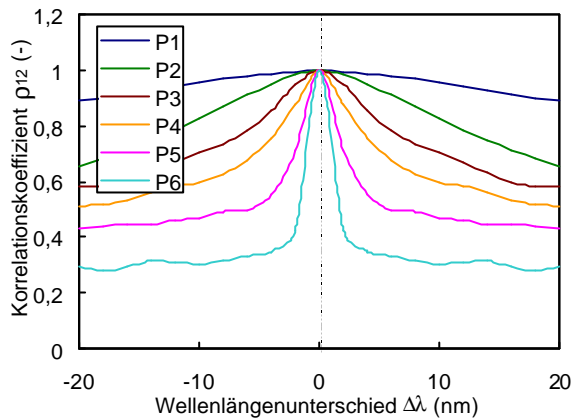


Abbildung 7.27 Spektrale Kreuz-Korrelation in Abhängigkeit der $\Delta\lambda$

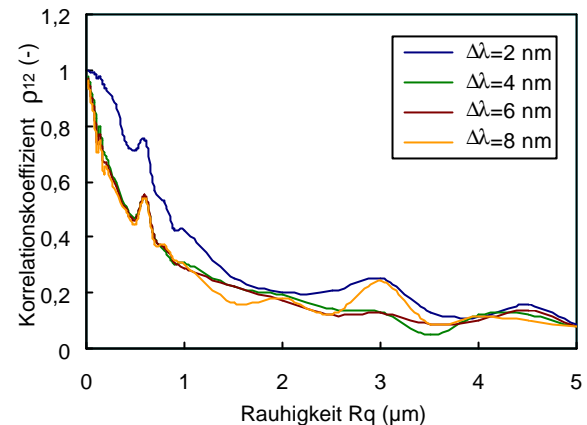


Abbildung 7.28 Spektrale Kreuz-Korrelation in Abhängigkeit der Rauigkeit

Für die spektrale Korrelation ist es charakteristisch, dass die Rauigkeitsabhängigkeit der Korrelation relativ wenig von dem verwendeten Wellenlängenunterschied abhängt. Sie kann daher zur gegebenen Messaufgabe nur schwierig angepasst werden, ihr theoretischer Anwendungsbereich ist bei $R_q=0..1.5-2 \mu\text{m}$ begrenzt. Bei kleinen Rauigkeiten lässt sich aber im Vergleich zu den anderen Kreuz-Korrelationsmethoden vorteilhaft anwenden, da die Kennlinie in der Nähe des Nullpunktes einen starken Gradienten besitzt.

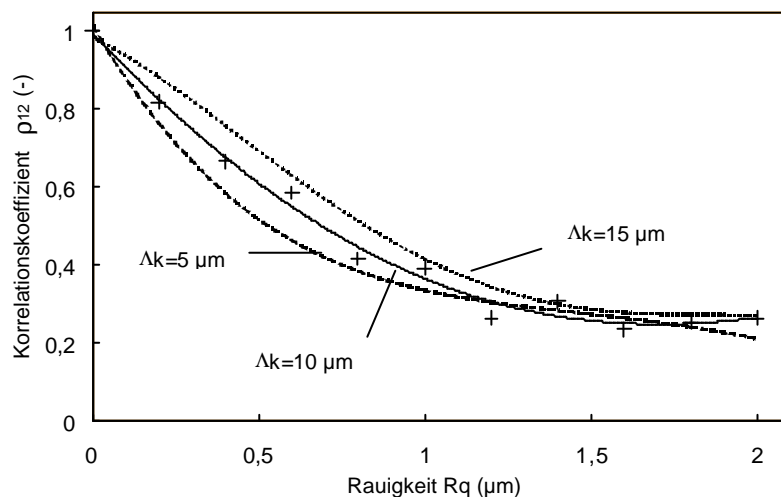


Abbildung 7.29 Einfluss der Korrelationslänge auf den spektralen Korrelationskoeffizienten

Zusammenfassung: Die Simulation der Kreuz-Korrelationsauswertung für störungsfreie Specklefelder weist die praktischen Resultate nach und gibt weitere Abschätzungen für die Einflüsse von Winkel- und Wellenlängenunterschiede bzw. Probenverschiebungen. Die angulare Korrelation wird durch eine relativ hohe Streuung und daher größerer Messunsicherheit gekennzeichnet. Die Ortskorrelation gewährleistet eine stabile Vermessung und kann dem zu messenden Rauigkeitsbereich gut angepasst werden (Abbildung 7.25). Die spektrale Korrelation lässt sich zur Aufgabe nicht adaptieren, liefert aber die zuverlässigste Kennlinie für niedrige Rauigkeiten.

7.5.3. Auto-Korrelation

Die Auto-Korrelationsfunktionen der simulierten Streufelder wurden in Abhängigkeit der Δt -Bildkoordinatenverschiebung innerhalb eines Rauigkeitsbereiches von $R_q=0..0.5 \mu\text{m}$ berechnet. Die normierten AKF-Funktionen der sechs vordefinierten Rauigkeitsprofile sind in Abbildung 7.30 dargestellt (die einzelnen Diagrammpunkte repräsentieren einen Durchschnitt von fünf AKF-Berechnungen). Ein Zusammenhang zwischen der AKF und der Rauigkeit besteht bis zu einer Verschiebung von $\Delta i=8$ Pixel; bei größeren Δt -Werten decken sich die Kurven.

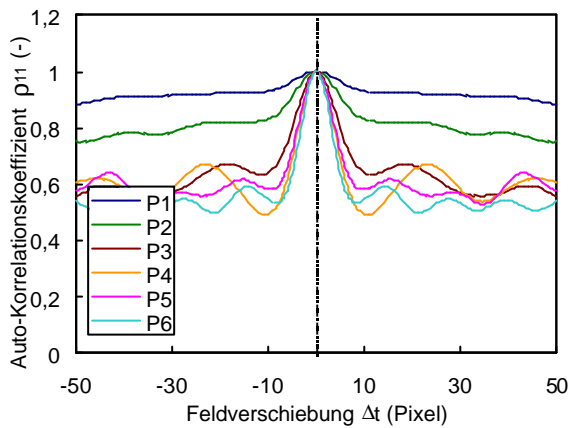


Abbildung 7.30 Auto-Korrelationskoeffizient in Abhängigkeit der Δt

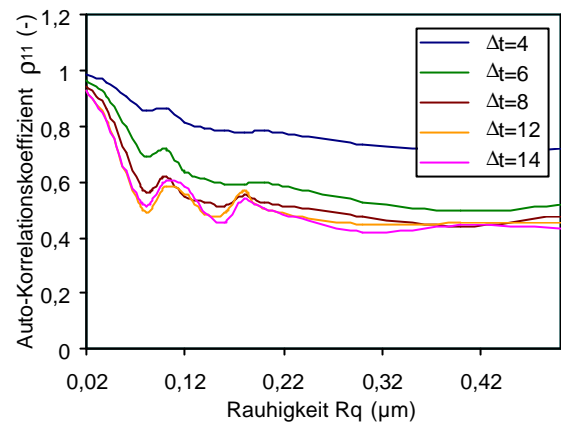


Abbildung 7.31 Auto-Korrelationskoeffizient in Abhängigkeit der Rauigkeit

Die Korrelationslänge hat keinen erheblichen Einfluss auf die Rauigkeitsabhängigkeit des Auto-Korrelationskoeffizienten (siehe Abbildung 7.32). Die Anwendungsgrenze ist auch eindeutig: die für den Speckle-Kontrast festgestellte Grenze von $R_{q\text{max}}=\lambda/4 \mu\text{m}$ spiegelt sich in den horizontalen Kurvenstrecken bei $R_q>0.15 \mu\text{m}$ wieder.

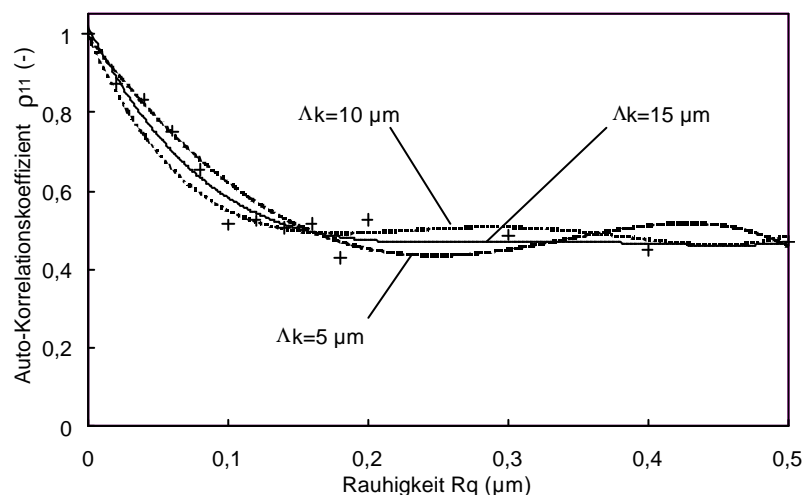


Abbildung 7.32 Einfluss der Korrelationslänge auf den Auto-Korrelationskoeffizienten

Die Anwendbarkeit der Auto-Korrelation erwies sich damit auch anhand der mit der Kirchhoffschen Näherung simulierten Ergebnisse als stark begrenzt.

7.6. Modellierung der Mehrfachstreuung

Bei stark geneigten Seitenwänden ist die im vorigen beschriebene einfache Simulation nicht ausreichend. Die von unteren Grubenflächen reflektierten Strahlungen müssen ebenfalls berücksichtigt werden, was zur Berechnung eines weiteren Beugungsintegrals führt. Die am Schirm erscheinende Amplitudenverteilung $A(t)$ wird in zwei Schritten bestimmt:

- direkte Rückstreuung von der Seitenwand: $H_1(x_1)$
- doppelte Reflexion von der Seitenwand und von der horizontalen Grubenfläche: $H_1(x_1)$ und $H_2(x_2)$

Als Schlussergebnis wird hernach der Gesamteffekt dieser beiden Einflüsse betrachtet. Die für die Mehrfachreflexion aufgestellte Simulationsanordnung und die wichtigeren geometrischen Größen sind in Abbildung 7.33 gezeigt. Oberfläche 1 stellt die Seitenwand der Werkzeugstruktur und Oberfläche 2 den unteren geätzten Flächenbereich dar (die reale Anordnung wurde um 90° nach links gedreht).

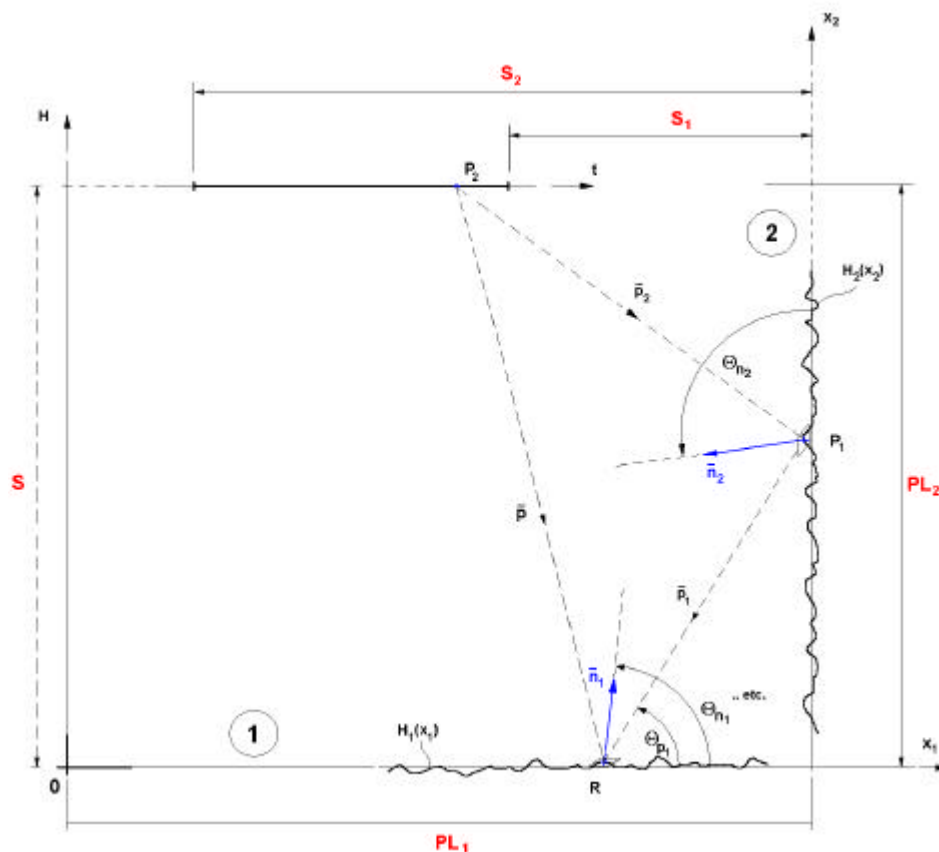


Abbildung 7.33 Geometrische Anordnung zur Simulation der Mehrfachreflexion an Strukturwänden

Die Berechnung der durch die direkte Rückstreuung hervorgerufenen Intensitätsverteilung entspricht dem im Kapitel 7.4. vorgestellten Algorithmus: in Profilverpunkten $H_1(x_1)$ werden die Richtungswinkel von Normal-, Einfall- und Reflexionsvektoren und daraus die Neigungsfaktoren berechnet; die komplexen Amplituden werden mit einem vereinfachten Beugungsintegral (7.7) und mit den Vektorlängen $|\vec{p}|$ ermittelt.

Zur Berechnung der sekundären Reflexion muss das Kirchhoffsche Beugungsintegral zweimal ausgeführt werden. Zuerst müssen die Amplitudenzustände in Punkten des Profils

$H_2(x_2)$ ermittelt werden; in Kenntnis der komplexen Amplituden in Oberfläche 2 kann hiernach das mehrfach gestreute Specklefeld am Schirm berechnet werden. Die erste Integralberechnung stellt formal einen solchen Algorithmus dar, wobei die H_2 -Oberflächenpunkte als Schirmpunkte betrachtet werden.

Beim zweiten Beugungsalgorithmus interpretiert die Software die Richtungswinkel um 90° nach links umgedreht, d.h. sie werden wieder von der Oberflächenkoordinatenrichtung definiert (siehe Abbildung 7.33). Die Einfall-Richtungswinkel sind in diesem Fall nicht eindeutig, sie werden deshalb willkürlich definiert wie folgt:

$$\Theta_{q2} = 180 - \arctg\left(\frac{PL_1}{PL_2}\right) \quad (7.17)$$

Insgesamt wird damit das Kirchhoffsche Beugungsintegral dreimal eingesetzt:

$$A_{1s}(t) = \frac{1}{iI} \int_{x_1}^{x_2} G(x_1) \cdot \frac{e^{i(k|\bar{p}| + \Phi_0(x_1))}}{|\bar{p}|} \cdot N_1(x_1, t) dx_1 \quad (7.18) \quad \text{das von Oberfläche 1. reflektierte Streufeld in den Schirmpunkten}$$

$$A_{12}(x_2) = \frac{1}{iI} \int_{x_1}^{x_2} G(x_1) \cdot \frac{e^{i(k|\bar{p}_1| + \Phi_0(x_1))}}{|\bar{p}_1|} \cdot N_1(x_1, x_2) dx_1 \quad (7.19) \quad \text{das von Oberfläche 1 reflektierte Streufeld in den Punkten der Oberfläche 2}$$

$$A_{2s}(t) = \frac{1}{iI} \int_0^{PL_2} A_{12}(x_2) \cdot \frac{e^{ik|\bar{p}_2|}}{|\bar{p}_2|} \cdot N_2(x_2, t) dx_2 \quad (7.20) \quad \text{das von Oberfläche 2 reflektierte Streufeld in den Schirmpunkten}$$

wobei X_1 und X_2 die Koordinaten der ausgeleuchteten Profilstrecke bezeichnet; die Vektorlängen von \bar{p} , \bar{p}_1 und \bar{p}_2 sind:

$$|\bar{p}| = \sqrt{(S - H_1(x_1))^2 + (x_1 - t)^2} \quad |\bar{p}_1| = \sqrt{(PL_1 - H_2(x_2) - x_1)^2 + (x_2 - H_1(x_1))^2} \quad (7.21) \quad (7.22)$$

$$|\bar{p}_2| = \sqrt{(PL_1 - H_2(x_2) - t)^2 + (S - x_2)^2} \quad (7.23)$$

Wie ersichtlich, sind die ersten beiden Integrale formal ähnlich, da sie derselben Koordinate entlang definiert werden und die Integralbereiche identisch sind. Die Software berechnet sie daher in einem Algorithmus, was einen weiteren Vorteil hat: man erhält gleichzeitig das Verhältnis der rückgestreuten und zur Bodenoberfläche reflektierten Lichtintensitäten.

Es darf aber nicht außer Acht gelassen werden, dass eine bestimmte Lichtmenge zwischen dem Schirm und der Bodenoberfläche "verloren geht" (dies entspricht der Praxis: die Intensität zwischen der Werkzeugstruktur und der Mattscheibe wurde nicht detektiert). Die ersten und die dritten Integrationen wurden deshalb über der gesamten Strecke $t=0..S_2$ durchgeführt. Die Intensitätsverhältnisse der primären und sekundären Reflexionen sind in Abbildung 7.34 veranschaulicht.

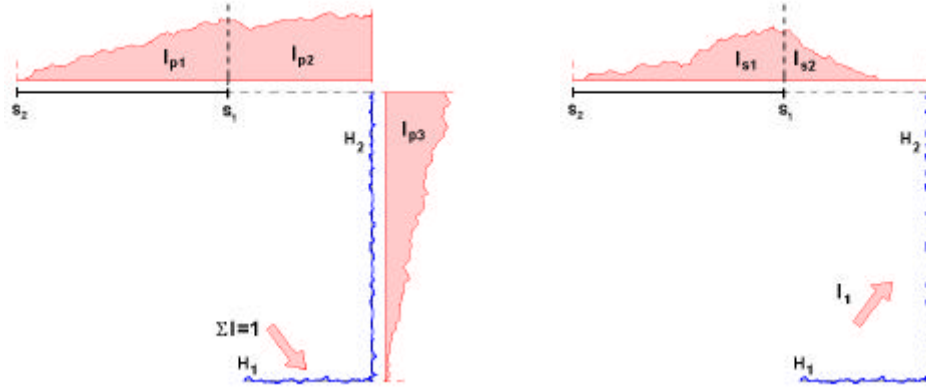


Abbildung 7.34 Berechnung der Intensitätsanteile von primären- und sekundären Reflexionen

Nimmt man an, dass die einfallende Gesamtintensität „1“ beträgt, so können die primären und die sekundären Intensitätsanteile prozentual ausgedrückt werden:

$$v_p = \frac{I_{p1}}{I_{p1} + I_{p2} + I_{p3}} \quad v_s = \frac{I_{p1} I_{s1} (I_{s1} + I_{s2})}{I_{p1} + I_{p2} + I_{p3}} \quad (7.24) \quad (7.25)$$

wobei die Werte $I_{p1..3}$ und $I_{s1..2}$ als über der gegebenen Strecke berechnete Linienflächen der Intensitätsverteilungen definiert werden. Nun geben v_p und v_s die Anteile der Intensitäten I_{p1} und I_{s1} relativ zur Einfallintensität an. Damit berechnet sich die Gesamtintensität zu:

$$I(t) = v_p I_{p1}(t) + r_R v_s I_{s1}(t) \quad (7.26)$$

worin ρ_R das Reflexionsvermögen des Oberflächenmaterials (nach Fresnel-Gesetzen) kennzeichnet. Wird die Einfallswinkelabhängigkeit der Reflektivität vernachlässigt, kann ρ_R als ein Festwert angesehen werden (z.B. für Silizium beträgt $\rho_R \approx 0.3$, siehe Diagramm 7.10).

Das Hauptfenster der für die Mehrfachstreuung entwickelten Simulationssoftware ist in Abbildung 7.35 gezeigt.

Beide Rauigkeitsprofile ($H_1(x_1)$ und $H_2(x_2)$) lassen sich mit beliebigen Parametern generieren, die Oberflächen werden in Diagrammen 1 und 2 dargestellt (die im Diagramm 1 befindlichen roten Linien bezeichnen den ausgeleuchteten Oberflächenbereich). Die Ergebnisse werden im Diagramm 3 angezeigt.

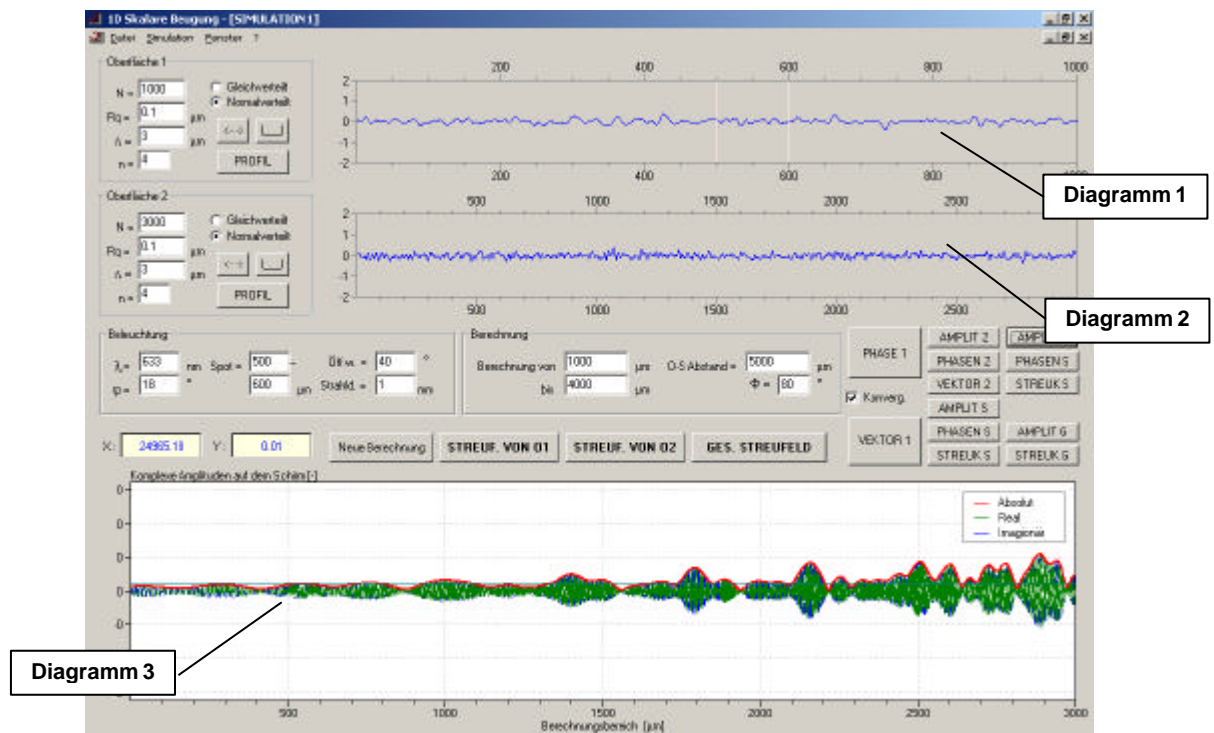


Abbildung 7.35 Simulationssoftware zur Untersuchung der Mehrfachreflexion

In der folgenden Tabelle 7.4 sind die der realen Konstruktion entsprechend definierten geometrischen Beleuchtungs- und Berechnungsparameter zusammengefasst.

| Daten / Bezeichnung | | Wert |
|----------------------------|----------------|----------------------|
| Oberfläche 1 $H_1(x_1)$ | R_{q1} | 0-0.5 μm |
| | Λ_{k1} | 5-15 μm |
| | PL_1 | 100 μm |
| | N_1 | 10000 |
| Oberfläche 2 $H_2(x_2)$ | R_{q2} | 0.1 μm |
| | Λ_{k2} | 10 μm |
| | PL_2 | 100000 μm |
| | N_2 | 10000000 |
| Beleuchtung | λ | 633 nm |
| | Θ_e | +15° |
| | O_1 | 25 μm |
| | O_2 | 75 μm |
| | Ψ | 2° |
| | I.-Vert. | normal |
| | S.-Dm. | 1 mm |
| Berechnung | S_1 | 30000 μm |
| | S_2 | 120000 μm |
| | S | 100000 μm |

Tabelle 7.4 Parameter-Einstellungen für die Anordnung in Abb. 7.36

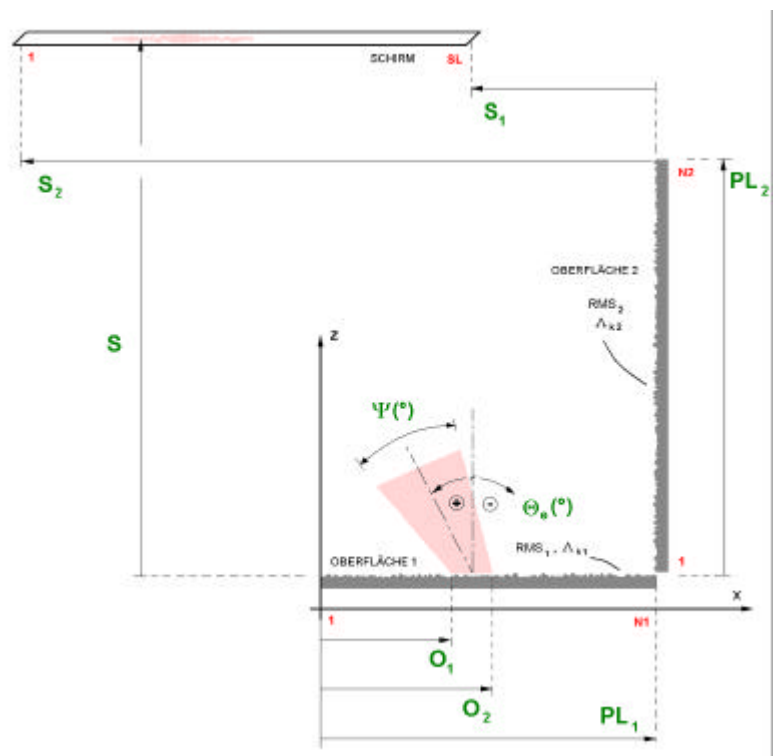


Abbildung 7.36 Geometrische Anordnung zur Untersuchung der Mehrfachreflexion an einer Strukturwand

Die beleuchtete Oberflächenlänge beträgt 50 μm , der Schirm liegt im Abstand 100 mm von der Seitenwand, die Schirmlänge ist 80 mm, der Einfallswinkel beträgt 15° in der Positivrichtung. Die Rauigkeit der Oberfläche 2 ist irrelevant, wird bei $R_{q2}=0.1 \mu\text{m} / \Lambda_{k2}=10 \mu\text{m}$ festgelegt.

Die ermittelbaren Ergebnisse und Diagramme sind zu den Daten von Tabelle 7.1 identisch. Dies ergänzt sich durch einen Filterungsprozess vom Streufeld $I(t)$, der der bei Vermessungen eingesetzten Filterung entspricht (hierbei wird natürlich ein eindimensionaler Filter eingesetzt).

Die maximale i-Koordinate der Messbilder betrug 576 Pixel, der nun $8 \cdot 10^6$ Simulationspunkte entspricht. Damit ergeben sich die Schnittfrequenzen für die Simulation zu $v_{TP}=2,22 \cdot 10^6$ N/Schrittweite und $v_{TP}=6,94 \cdot 10^4$ N/Schrittweite; die Ordnung der Butterworth-Filter beträgt gleich 5.

In den nachstehenden Diagrammen ist ein Simulationsbeispiel für eine H_1 -Oberfläche mit Parametern $R_q=0.15 \mu\text{m} / \Lambda_k=10 \mu\text{m}$ dargestellt.

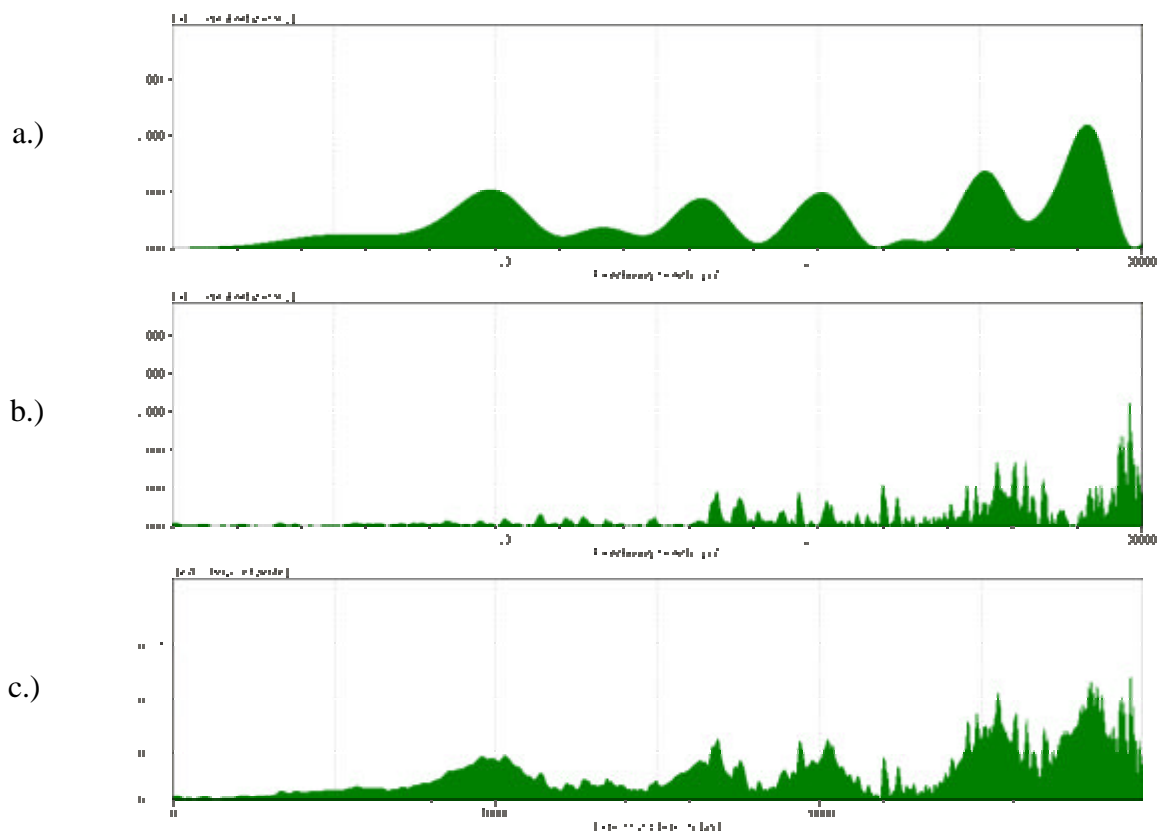


Abbildung 7.37 Simulierte Streukoeffizienten: a) primäre Reflexion b) sekundäre Reflexion c) Gesamtfeld am Schirm

Nach Durchführung der Integration (7.18) erhält man für primäre Reflexion die Streulichtverteilung $I_{p1}(t)$ im Diagramm 7.37/a. Entsprechend der kurzen Beleuchtungsgröße am Profil H_1 wird die Verteilung durch eine große Specklelänge gekennzeichnet. Diagramm 7.37/b stellt die mit Beziehung (7.20) berechnete $I_{s1}(t)$ -Verteilung dar, die dem von der Bodenoberfläche gestreuten Störsignal entspricht. Abbildung 7.37/c zeigt schließlich die nach

Formel (7.26) berechnete proportionale Summe der primären und sekundären Reflexionen ($I(t)$).

In den Diagrammen ist der Unterschied der Ortsfrequenzen gut zu erkennen, was mit den praktischen Erfahrungen übereinstimmt. Die relativ niedrige Intensität der sekundären Streuung lässt sich einerseits mit dem niedrigen Reflexionsvermögen des verwendeten Materialmodells (Silizium, $\rho_R \approx 0.3$) erklären andererseits wird ein erheblicher Anteil des Streufeldes als $I_{s2}(t)$ nicht detektiert (siehe Abbildung 7.34).

Aus Formel (7.17) ergeben sich relativ hohe Einfallswinkel für das Beugungsintegral (7.20) (Oberfläche 2). Die Gültigkeit der Kirchhoffschen Näherung ist hierbei daher fraglich, die Verteilung $I_{s1}(t)$ ist mit Vorsicht anzunehmen. Da das sekundäre Streufeld bei der Auswertung keine Rolle spielt, kann diese Ungenauigkeit vernachlässigt werden.

Die Kriteriums-Ausdrücke für die primäre Streuung sind den in Tabelle 7.3 angegebenen Werten ähnlich (störungsfreie Reflexion), die Gültigkeitsbedingungen sind jeweils erfüllt (wegen des kleineren Einfallswinkels ergeben sich sogar höhere Werte).

7.7. Simulationsergebnisse für die Mehrfachstreuung

In den folgenden Diagrammen 7.38 und 7.39 sind die Simulationsergebnisse für die Mittelintensität und den Kontrast in Abhängigkeit der Rauigkeit dargestellt. Die einzelnen Berechnungen wurden zehnmal wiederholt, die Streuungen der Resultaten werden durch die Fehlerindikator-Linien veranschaulicht. Die Messparameter wurden sowohl vor als auch nach Durchführung des Filterprozesses bestimmt.

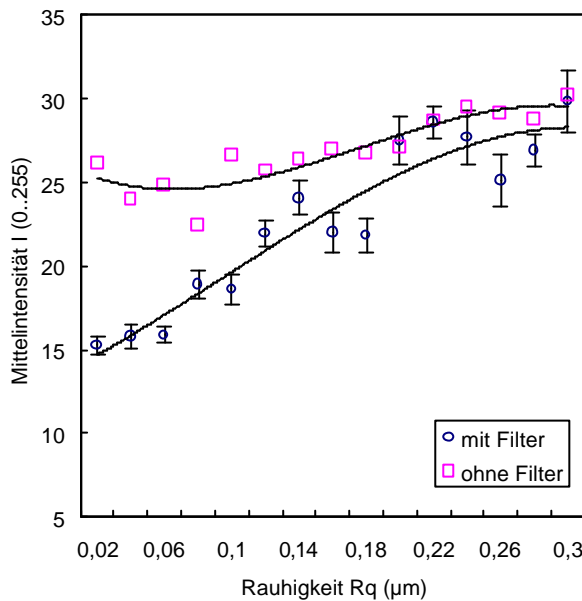


Abbildung 7.38 Simulierte Speckleintensität mit Mehrfachstreuung

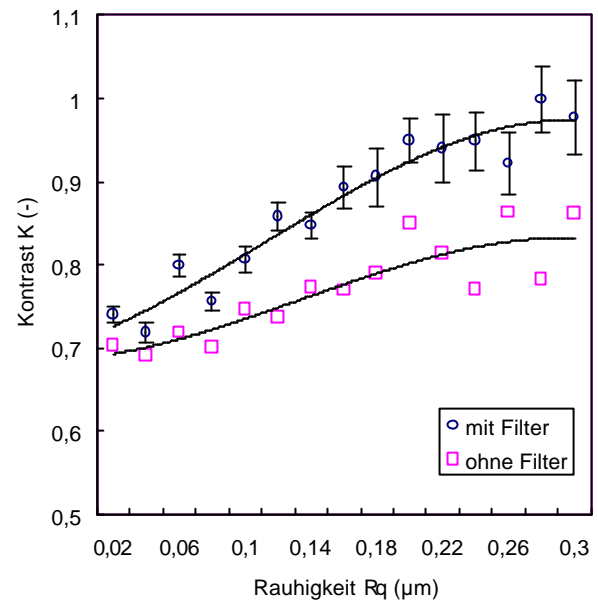


Abbildung 7.39 Simulierter Speckle-Kontrast mit Mehrfachstreuung

Die Abweichung zwischen den Mittelintensitäten der gestörten $I(t)$ und gefilterten Specklefelder ist rauigkeitsabhängig (fällt bei größeren R_q -Werten ab), was zum Verhältnis der direkt rückreflektierten und der sekundär gestreuten Intensitäten zurückgeführt werden kann. Für kleine Rauigkeiten an $H_1(x_1)$ wird ein größerer Anteil der Gesamtintensität in Richtung der Oberfläche $H_2(x_2)$ gestreut. Das Gesamtstreuungsfeld besteht nun meistens aus Komponenten mit niedriger Ortsfrequenz, damit ein größerer Intensitätsanteil durch die Filterung eliminiert wird. Dieser Effekt war bereits bei den Experimenten auszuweisen (siehe Kapitel 6.2) und kann hinsichts der Auswertung als vorteilhaft angesehen werden: er erhöht die Steilheit der Kurve 7.38.

Auch die modellierten Werte des Speckle-Kontrastes spiegeln die erwartete Beziehung wieder: mit Zunahme der Rauigkeit R_{q1} steigt die Abweichung zwischen den Kontrasten der gestörten und gefilterten Verteilungen an, die Gradient der Kennlinie erhöht sich (Diagramm 7.39). Bei beiden statistischen Parametern ist festzustellen, dass die steilen Kurvenstrecken (Anwendungsbereiche) im Vergleich zu den theoretischen und den mit störungsfreier Reflexion simulierten Ergebnissen breiter sind. Dies kann ebenfalls auf den Einfluss des Verhältnisses I_p/I_p+I_s zurückgeführt werden.

In den nachstehenden Diagrammen sind die Simulationsergebnisse für die Kreuz- und Auto-Korrelationen ersichtlich. Auf die Streuung der Simulationsergebnisse weisen die Fehlerindikatoren hin.

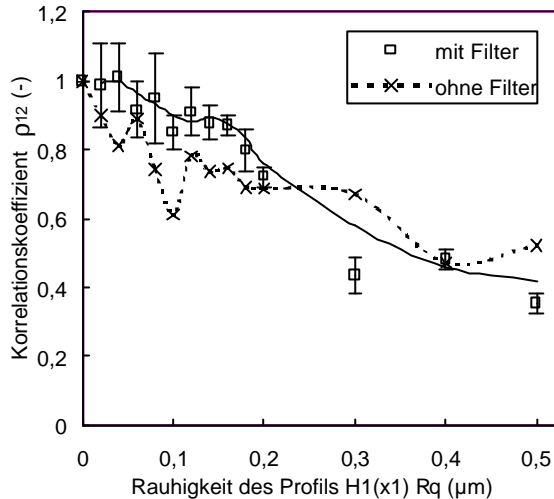


Abbildung 7.40 Simulierte angulare Korrelation mit Mehrfachstreuung; $\Delta\phi=0.5^\circ$

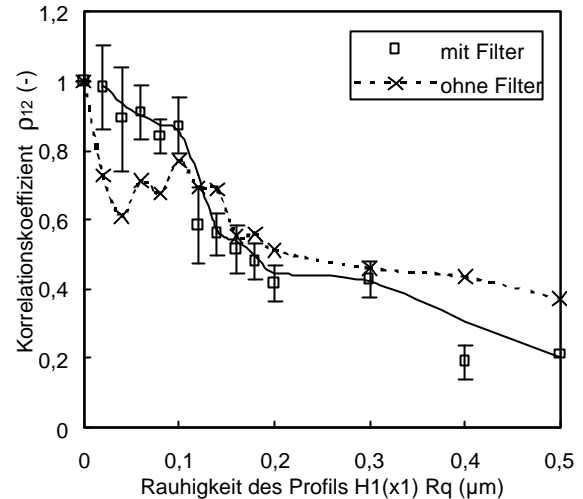


Abbildung 7.41 Simulierte Ortskorrelation mit Mehrfachstreuung; $\Delta x=3 \mu\text{m}$

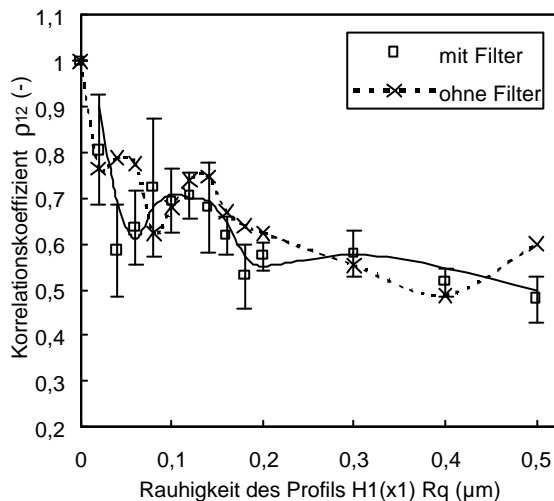


Abbildung 7.42 Simulierte spektrale Korrelation mit Mehrfachstreuung; $\Delta\lambda=5 \text{ nm}$

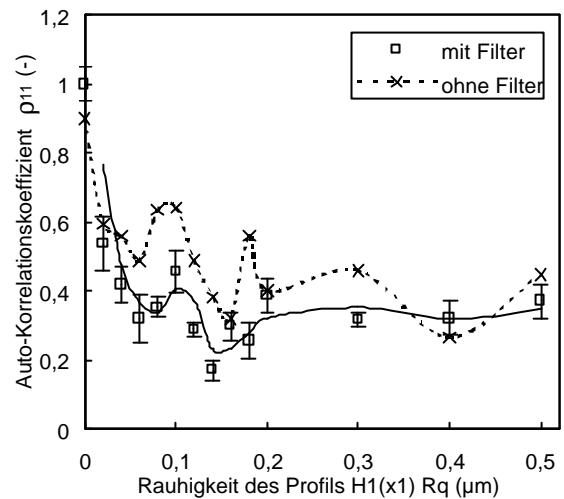


Abbildung 7.43 Simulierte Auto-Korrelation mit Mehrfachstreuung; $\Delta t=8 \text{ Pixel}$

Generell kann man sagen, dass die Ausfilterung der sekundären Störreflexion einen positiven Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Korrelationskoeffizienten und Rauigkeit des Profils $H_1(x_1)$ ausübt. Dies ist am besten bei den Orts- (Diagramm 7.41) und angularen Korrelationen (Diagramm 7.42) zu sehen, wobei die Koeffizientenwerte bei kleinen Seitenwandrauigkeiten durch Beseitigung des Störsignals wesentlich höher sind.

Die Auto-Korrelationskoeffizienten von simulierten Specklemustern ergeben im Vergleich zu den experimentellen Resultaten eine regelmäßige Beziehung. Obwohl auch die gemessenen ρ_{11} -Werte eine leichte Steigung im Bereich von $R_q=0..0.15 \mu\text{m}$ aufweisen (Kapitel 6.4), ist der Zusammenhang - vor allem wegen der hohen Unsicherheit - nicht ausreichend.

Mit Zunahme der Seitenwandrauigkeit steigt die Intensität der primären Reflexion im detektierbaren Streufeld, womit auch die Zuverlässigkeit des berechneten Korrelationskoeffizienten höher wird. Dies spiegelt sich dann als ein Streuungsabfall bei größeren R_q -Werten wieder (siehe Fehlerindikatoren bei jeder Korrelationsauswertung).

7.8. Vergleich der experimentellen und rechnerischen Resultate

Sowohl bei den praktischen Vermessungen als auch bei Kirchhoffschen Näherungsberechnungen wurden bereits auf die Übereinstimmung mit den theoretischen Beziehungen hingewiesen. In den nächsten Diagrammen werden die experimentalen Ergebnisse von vier Methoden mit den durch skalare Beugungstheorie berechneten Abhängigkeiten verglichen. Wo es möglich war, sind auch die rein theoretisch abgeleiteten Beziehungen (Kapitel 3.) angegeben. Alle Angaben beziehen sich auf Gesamtreflexion (GR).

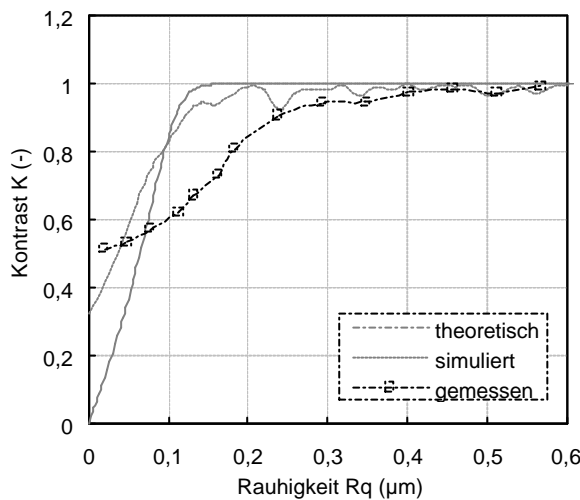


Abbildung 7.44 Vergleich der theoretischen, simulierten und gemessenen Abhängigkeiten für Speckle-Kontrast

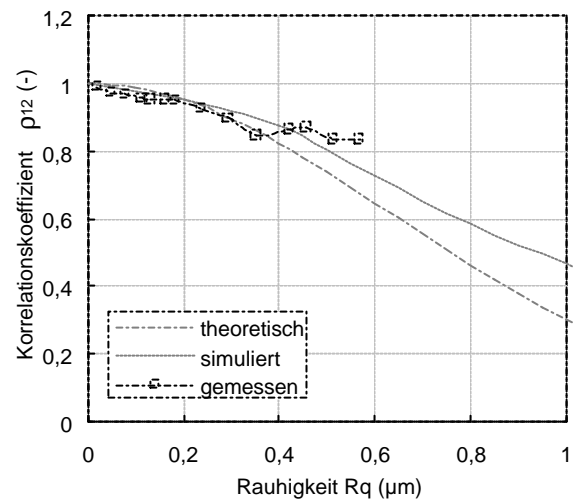


Abbildung 7.45 Vergleich der theoretischen, simulierten und gemessenen Abhängigkeiten für angulare Korrelation

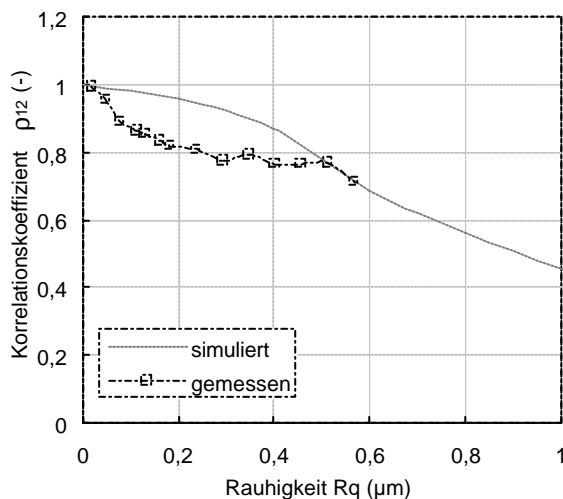


Abbildung 7.46 Vergleich der simulierten und der gemessenen Abhängigkeiten für Ortskorrelation

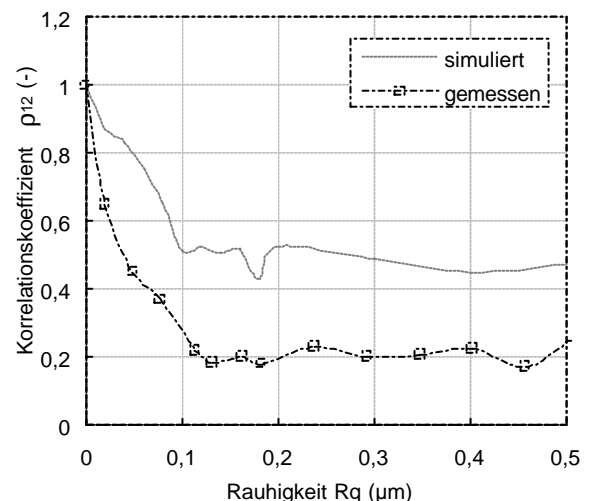


Abbildung 7.47 Vergleich der simulierten und der gemessenen Abhängigkeiten für Auto-Korrelation

Der Vergleich wird dadurch begrenzt, dass die experimentalen Vermessungen nur einen mikrotechnologisch relevanten Bereich von $R_q=0.05 \mu\text{m}$ umfassten. Im allgemeinen ist zu sagen, dass die theoretischen und die praktischen Abhängigkeiten über dem untersuchten Intervall gut übereinstimmen. Bei Kreuz-Korrelationen ist die höchste und bei statistischen Methoden ist die niedrigste Übereinstimmung zu entdecken.

Eine wesentlichere Abweichung kann beim Speckle-Kontrast entdeckt werden, wobei die Gradient der gemessenen Kennlinie kleiner als die entweder der theoretischen oder die mit der Simulation berechneten Kurve ist. Dementsprechend ist der praktische Messbereich breiter ($R_q < 0.25\text{-}0.3\text{ }\mu\text{m}$), was allerdings positiv aufgefasst werden kann.

Bei Kreuz-Korrelationen (Abbildungen 7.45-46) lenkten die langen, steilen $R_q\text{-}\rho_{12}$ Kurvenstrecken die Aufmerksamkeit darauf, dass die Messbereiche dieser Methoden bis zum Mehrfachen des untersuchten Rauigkeitsintervalls ausgeweitet werden kann ($R_q < 2\text{-}3\text{ }\mu\text{m}!$). Die Auswertung muss jedoch durch Auswahl der optimalen Einfallswinkeländerung oder Probenverschiebung der gegebenen Messproblematik jeweils adaptiert werden.

Die gemessene Abhängigkeit der Auto-Korrelation besitzt eine höhere Gradient als die anhand der skalaren Beugungstheorie berechnet wurde (Abbildung 7.47), stimmen sie aber charaktermäßig überein und die Anwendungsbereiche fallen zusammen: $R_q < \text{ca. } 0.15\text{ }\mu\text{m}$.

Obwohl die simulierten und die experimentalen Ergebnisse für Mehrfachstreuung nicht identisch sind, wurden die Abhängigkeiten zumindest qualitativ nachgewiesen (siehe die Diagramme 7.40-43).

Kapitel 8.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein optisches parametrisches Verfahren vorgestellt, mit welchem die Rauigkeit an den Seitenwänden von Mikroabformwerkzeugen auf Basis der monochromatischen Speckle-Kontrast- und Speckle-Korrelationsprinzipien untersucht werden kann. Schwerpunkte waren dabei das Ermitteln der nutzbaren Messsignale, die Auswahl von optischen Parametern, die die Rauigkeit der vertikalen Flächen am besten beschreiben, die Optimierung des parametrischen Verfahren und das Aufstellen des entsprechenden Messmodells. Im zweiten Teil der Arbeit wurde ein allgemeiner Simulationsalgorithmus entwickelt, mit dem die verwendeten Specklemethoden sich für beliebige Anordnungen exakt beschreiben lassen.

Der Überblick über den in der Mikrotechnik üblichen Oberflächenmessverfahren zeigt, dass die vertikalen Mikrostrukturflächen mit den konventionellen Methoden ohne Modifikationen nicht analysiert werden können. Von den Lösungsmöglichkeiten wurden die auf kohärente Streuung basierenden Speckleverfahren ausgewählt, deren Vorteile die berührungslose und schnelle Vermessung, die flexible Einsetzbarkeit und die Möglichkeit zur Abtrennung der Störsignale sind.

Bei der praktischen Realisierung des Messsystems wurde besonders beachtet, dass die von Strukturwänden gestreuten Specklefelder innerhalb der geometrischen Grenzen in einem möglichst breiten Raumteil detektiert werden. Um eine schnelle Auswertung zu erreichen, wurden die notwendigen Berechnungen in einer Messsoftware integriert. Nach Feststellung der endgültigen Konstruktion wurde ein Filterprozess entwickelt, mit dem die Störsignale vom Messsignal getrennt werden konnten. Um eine optimale Funktion zu erreichen, war dabei die Kombination eines Tiefpass- und eines Hochpass-Filters notwendig. Schwankungseffekte, die bei der Rücktransformation auftreten können, wurden mit Verwendung von Butterworth-Kantenübergängen unterdrückt.

Die mittlere Intensität und der Kontrast der Specklefelder erwiesen sich von den statistischen Kenngrößen erster Ordnung als die zuverlässigsten Messparameter. Die experimentell bestimmte Kennlinie des Speckle-Kontrastes stimmt mit dem theoretischen Zusammenhang überein, obwohl der praktische Anwendungsbereich sich als breiter erwies: bei dem konkreten Aufbau gewährleisteten die statistischen Vermessungen eine eindeutige Beziehung bis zur Rauigkeit $R_q=0.25-0.3\text{ }\mu\text{m}$.

Es war nachzuweisen, dass die Rauigkeit neben den konventionellen Winkel- und spektralen Korrelationen auch durch die mit einer Oberflächenverschiebung berechnete örtliche Korrelation charakterisiert werden kann. Die bei den Kreuz-Korrelationen verwendeten Einfallswinkeländerungen und Probenverschiebungen beeinflussen die Steilheit der erhaltenen Kennlinien. Dies bietet die Möglichkeit, die Verfahren zu gegebenen Messproblemen anzupassen und die höchste Messgenauigkeit innerhalb des erforderlichen Messbereichs zu erreichen. Mit entsprechenden Einstellungen sichern beide Kreuz-Korrelationen eine ausreichende Beziehung in dem gesamten, mikrotechnisch relevanten Rauigkeitsbereich von $R_q=0..0.5\ \mu\text{m}$. Die Möglichkeit für Anwendung des Auto-Korrelationskoeffizienten als Rauigkeitsparameter, die in der Literatur in mehreren Stellen zu finden ist, wurde nachgewiesen. Dabei war zu zeigen, dass die $AKF(x)$ des Intensitätsfeldes im wesentlichen mit dem Speckle-Kontrast in Verknüpfung steht, ihre Messbereiche sind identisch.

Auf die Genauigkeiten der einzelnen Specklemethoden wurden aus der wahrscheinlichkeitstheoretischen Analyse der mit dem kalibrierten Aufbau durchgeführten Messungen gefolgert. Zur Berechnung der Konfidenzintervalle wurde ein Algorithmus vorgeschlagen, welcher sowohl die systematischen als auch die zufälligen Fehler der Ergebnisse berücksichtigt und damit für Bewertung beliebiger parametrischen Messungen geeignet ist. Die engsten erreichbaren Zuverlässigkeitsintervalle ergeben sich im Falle der vollständigen Reflexion zu ca. $r= \pm 5\ %$ und für gestörte Reflexion zu $r= \pm 10\ %$. Die Anwendbarkeit der Methoden spiegeln sich auch in den Konfidenzradien wieder: im Rauigkeitsbereich von $R_q=0..0.15\ \mu\text{m}$ wiesen die Speckle-Kontrast- und die Auto-Korrelationsauswertungen eine niedrigere Messunsicherheit auf, während die Kreuz-Korrelationsverfahren für die höheren Rauigkeiten zuverlässigere Ergebnisse liefern.

Eine Möglichkeit zur genaueren Analyse der Speckletechniken und für Untersuchung von Effekten, die bei den Experimenten nicht zu erfassen waren, wird durch die Kirchhoffsche Näherung der skalaren Beugungstheorie angeboten. Der Algorithmus dafür wurde durch Entwicklung eines Simulationsprogramms realisiert, wobei die von einem beliebigen Rauigkeitsprofil reflektierte objektive Speckleverteiling neben beliebiger geometrischen Anordnung und Beleuchtung bestimmt werden kann. Die Simulation gab die Möglichkeit, die an steilen Seitenwänden mehrfach gestreuten Verteilungen zu ermitteln, wodurch die Funktion des Messsystems sich vollständig modellieren ließ.

Die Kirchhoffschen Berechnungen, die sowohl für störungsfreie als auch für mehrfache Reflexionen durchgeführt wurden, bestätigten die experimentell erhaltenen Ergebnisse. Die Simulation der Kreuz-Korrelationen weist darauf hin, dass der Korrelationskoeffizient außer der vertikalen Rauigkeit auch durch den horizontalen Rauigkeitsparameter beeinflusst wird. Der Speckle-Kontrast und die Auto-Korrelation zeigt dagegen keine Abhängigkeit von der Korrelationslänge der Oberfläche.

Das Simulationsprogramm bot die Möglichkeit, die analytisch nicht beschreibbare Ortskorrelation zu untersuchen. Die simulierten Kennlinien ergaben, dass der Messbereich, sowohl bei den traditionellen spektralen- und angularen Korrelationen als auch bei der Ortskorrelation, um das Mehrfache des experimentell untersuchten Intervalls ausgeweitet werden kann. Das breiteste Anwendungsintervall war bei der Ortskorrelation zu beobachten, mit welcher im Falle entsprechender Probenverschiebung die Rauigkeiten bis zu $R_q= 5\ \mu\text{m}$ erfassbar sind.

Die Speckle Messverfahren haben sich für die Rauigkeitsanalyse lateraler Oberflächen von Mikroabformwerkzeugen und Mikrostrukturen als geeignet erwiesen. Das aufgebaute Messsystem stellt eine erste gerätetechnische Realisierung und damit einen wichtigen Schritt in Richtung auf eine praktische Anwendung dar.

Anhänge

Statistische Messgrößen für GESAMTREFLEXION

in Bezugsstrecke
berechnete ->
Kenngrößen
von Specklemustern

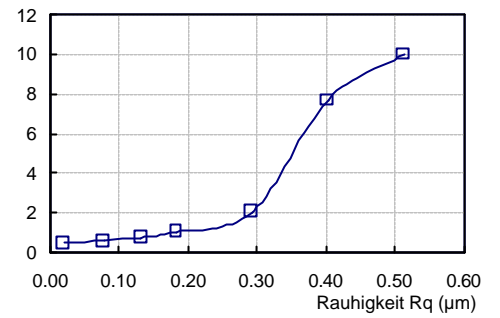
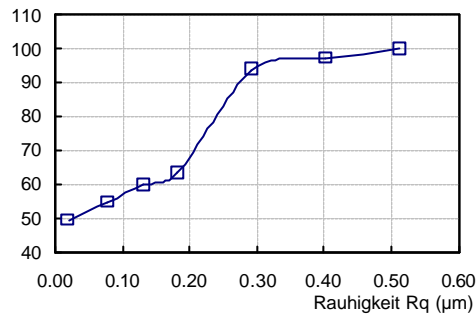
Mittelwert \bar{G}

Streuung S_G

$G_1 =$

Mittelintensität

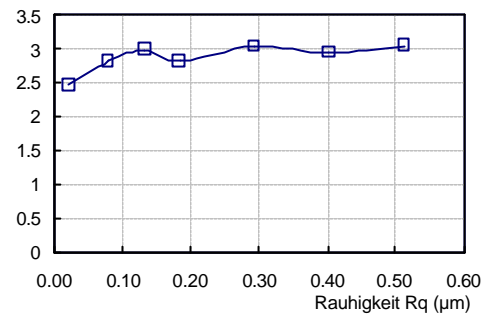
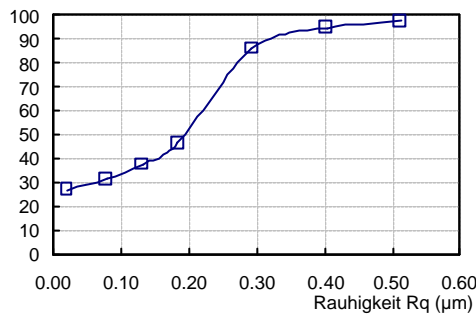
$$\langle I \rangle = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)$$



$G_2 =$

2D-
Standardabweichung

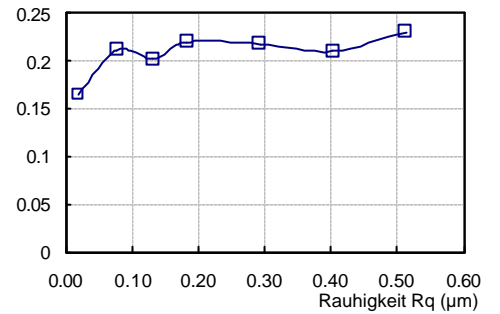
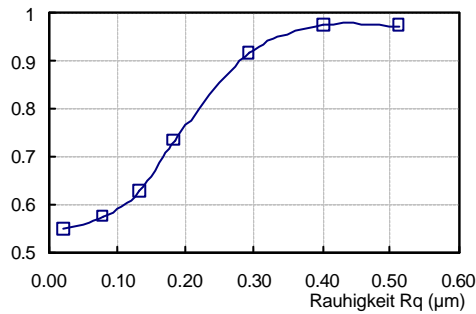
$$s_I = \sqrt{\frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\langle I \rangle - I(i, j))^2}$$



$G_3 =$

2D-Kontrast

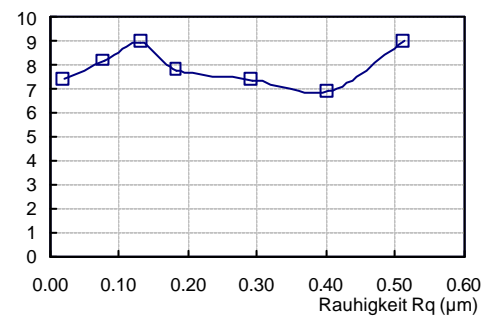
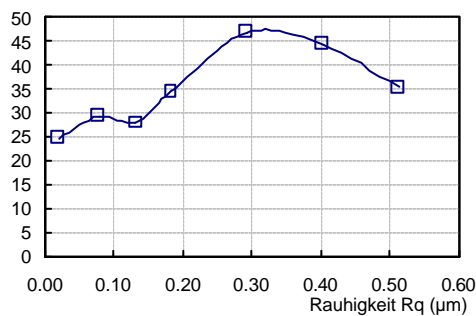
$$K = \frac{s_I}{\langle I \rangle}$$



$G_4 =$

absolute Abweichung
von Mittelintensitäten

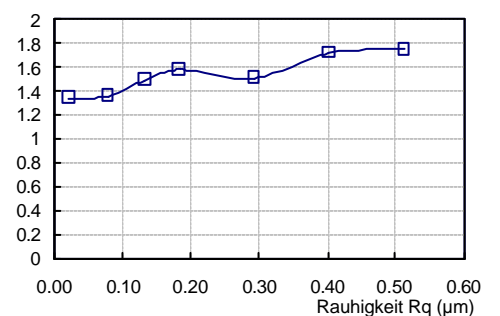
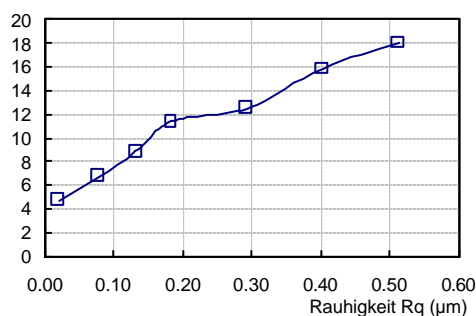
$$\langle I_Y \rangle - \langle I_{Y-1} \rangle$$



$G_5 =$

Subtraktion von
Speckleverteilungen

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |I_Y(i, j) - I_{Y-1}(i, j)|$$



Statistische Messgrößen für TEILWEISE REFLEXION

in Bezugsstrecke
berechnete ->
Kenngrößen
von Specklemustern

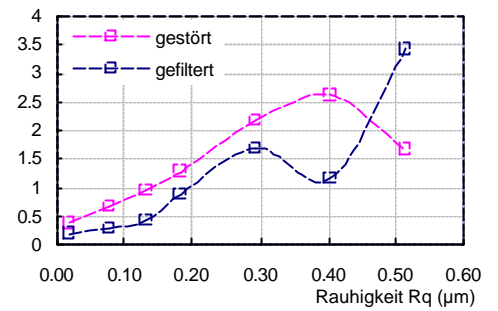
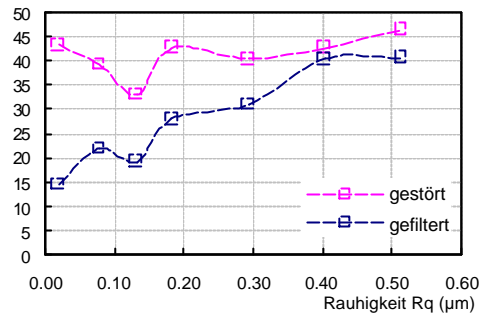
Mittelwert \bar{G}

Streuung S_G

$G_1 =$

Mittelintensität

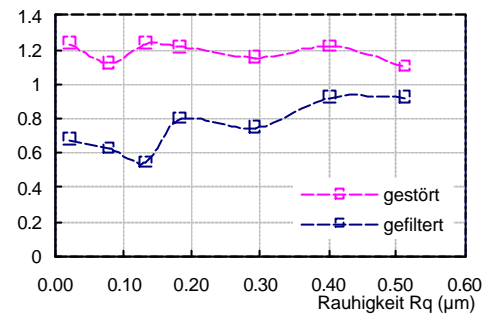
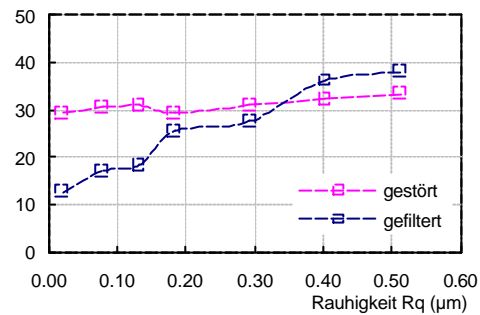
$$\langle I \rangle = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)$$



$G_2 =$

2D-
Standardabweichung

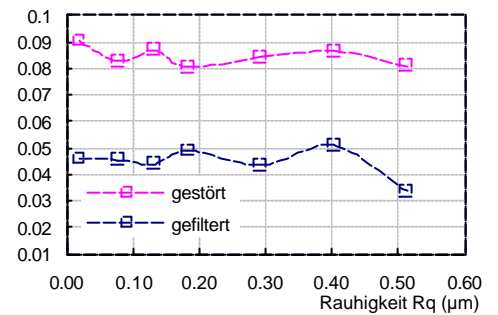
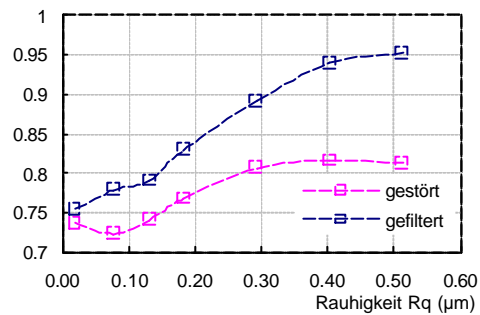
$$s_I = \sqrt{\frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\langle I \rangle - I(i, j))^2}$$



$G_3 =$

2D-Kontrast

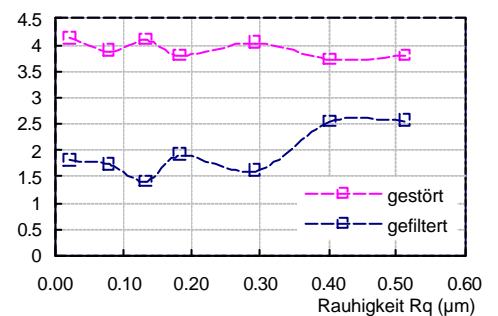
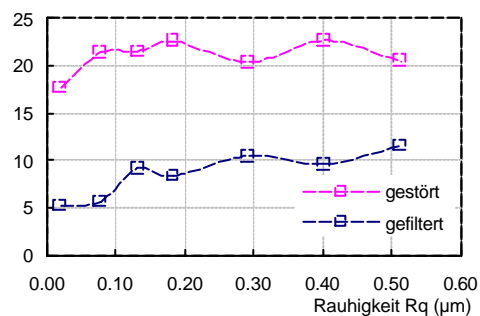
$$K = \frac{s_I}{\langle I \rangle}$$



$G_4 =$

absolute Abweichung
von Mittelintensitäten

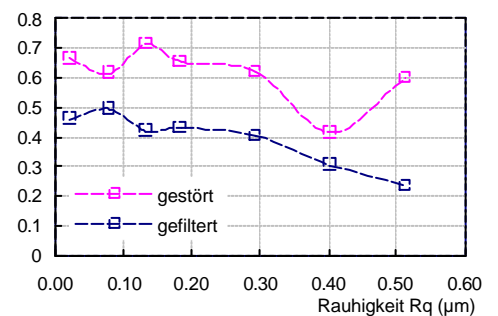
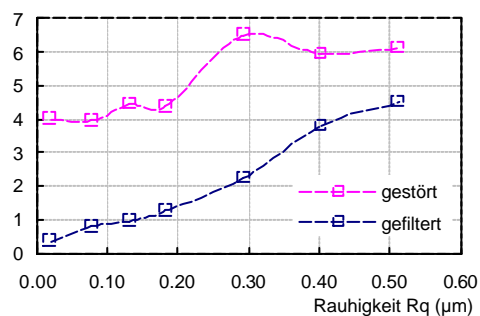
$$\langle I_Y \rangle - \langle I_{Y-1} \rangle$$



$G_5 =$

Subtraktion von
Speckleverteilungen

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |I_Y(i, j) - I_{Y-1}(i, j)|$$



Technische Daten des Messsystems

| Daten | | Wert |
|-----------------|--------------------------|---|
| Auswertung | Messbare Parameter: | $R_a, R_q, R_{ziso}, R_{zdin}$ |
| | Messbereich: | $R_a \leq 0.5 \mu m$ $R_q \leq 0.7 \mu m$ $R_z \leq 1.5 \mu m$ |
| | Messgenauigkeit: | $R_a: \pm 0.04 \mu m$ $R_q: \pm 0.03 \mu m$ $R_z: \pm 0.08 \mu m$ |
| | Messzeit: | $10 s \leq t \leq 50 s$ |
| Mikrostrukturen | Seitenwandwinkligkeit: | $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ |
| | Strukturtiefe: | $T \geq 25 \mu m$ |
| | Strukturbreite: | $B \geq 300 \mu m$ |
| Lasermodule | Beleuchtungswellenlänge: | $\lambda = 633 \text{ nm (rot)}$ |
| | Leistung: | $P = 15 \text{ mW}$ |
| | Einfallswinkel: | $\phi = 15^\circ$ |
| | Arbeitsabstand: | $L = 30 \text{ mm}$ |
| | Laserspotdurchmesser: | $D_{spot} = \text{ca. } 20 \mu m$ |
| Sensor | CCD : | $\frac{1}{2} \text{ Inch}$ |
| | Auflösung: | 768 x 576 Pixel |
| Steuerung | Schnittstellen: | RS232, PCI (Frame Grabber) |
| | Betriebssystem: | Windows NT/2000 |

Literatur

- [1] Alida A. Russo, Enrique E. Sicre: Real-time measurement of surface roughness through modulated speckle. *Journal Optical Society of America*, 61, (1425-), 1996.
- [2] Anschütz J., Ruffing B.: Surface roughness measurement by 2D digital correlation of speckle images. *SPIE*, 814, (105-12), 1987.
- [3] Asakura T., Fujii H., Shindo Y.: Measurement of surface roughness properties by means of laser speckle techniques. *Optics Communication*, 16, (68-72), 1976.
- [4] Asakura T.: Surface roughness measurement in speckle metrology. *Academic Press*, New York, 1978.
- [5] Basano L., Leporatti S., Ottonello P., Palestini V., Roland R.: Measurements of surface roughness: use of a CCD camera to correlate doubly scattered speckle patterns. *Applied Optics*, 34, (7286-), 1995.
- [6] Bass F.G, Fuks I.M.: Wave scattering from statistically rough surfaces. *Pergamon Press*, Oxford, 1979.
- [7] Baumgart J.: Die Messung der Mikrogeometrie von rauhen technischen Oberflächen mit Streulicht. *Dissertation, Technische Universität Ilmenau*, 2000.
- [8] Bennett J.M., Burge D.K., Rahn J.P., Bennett H.E.: Standards for optical surface quality using total integrated scattering. *Contemporary Optical Systems and Components Specifications, Proc. SPIE*, 181, (124-), 1980.
- [9] Bennett J.M., Hadaway J., Ahmad A.: Final design, assembly and testing of a space-based total integrated scatter instrument. *Proceedings of SPIE*, 3141, (209-219), 1997.
- [10] Birkebak R.C.: Optical and mechanical RMS surface roughness comparison. *Applied Optics*, 10, (1970-), 1971.
- [11] Bruce N.C., Dainty J.C.: Multiple scattering from random rough surfaces using the Kirchhoff approximation. *Journal of Modern Optics*, 38, (579-590), 1991.
- [12] Church E.L., Zavada J.M., Jenkinson H.A.: Measurement of the finish of diamond-turned metal surfaces by differential light scattering. *Optical Engineering*, 16, (360-366), 1977.
- [13] Cloud G.L.: Optical methods of engineering analysis. *Cambridge University Press*, Cambridge, 1995.
- [14] Dainty J.C.: Laser speckle and related phenomena. *Springer*, 1984.
- [15] Depew C.A., Weir R.D.: Surface roughness determination by the measurement of reflectance. *Applied Optics*, 10, (969-), 1971.
- [16] Elson J.M., Bennett J.M.: Relation between angular dependence of scattering and the statistical properties of optical surfaces. *Journal Optical Society of America*, 69, (31-), 1979.
- [17] Fleischer J., Ruffing B.: Spectral correlation of partially or fully developed speckle patterns generated by rough surfaces. *Journal Optical Society of America*, 2, (1637-43), 1985.
- [18] Francon M.: Laser speckle and applications in optics. *Academic Press*, New York, 1979.
- [19] Fricke-Begemann T., Glker G., Hinsch K.D., Wolff K.: Corrosion monitoring with speckle correlation. *Applied Optics*, 38, (-5948), 1992.
- [20] Frieden B.R.: Probability, statistical optics and data testing. *Springer*, Berlin, 1991.
- [21] Fujii H., Asakura T.: A contrast variation of image speckle intensity under illumination of partially coherent light. *Optics Communication*, 12, (32-38), 1974.
- [22] Fujii H., Asakura T.: Roughness measurements of metal surfaces using laser speckle. *Applied Optics*, 31, (4334-), 1992.

- [23] Fung A.K., Chen M.F.: Numerical simulation of scattering from simple and composite random surfaces. *Journal Optical Society of America*, 12, (2274-2284), 1985.
- [24] Gercbach I.B.: Measurement theory for engineers. *Springer*, 2003.
- [25] Goch G., Patzelt S., Smollich C.: Characterisation of optically smooth and structured surface topographies based on monochromatic scattered light techniques. *Technische Universität Ilmenau, 47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, 2002.
- [26] Goodman J.W.: Dependence of image speckle contrast on surface roughness. *Optics Communication*, 14, (324-27), 1975.
- [27] Goodman J.W.: Laser speckle and related topics. *Springer*, 2. Auflage, 1984.
- [28] Goodman J.W.: Statistical optics. *Wiley*, New York, 1985.
- [29] Hans M. Pedersen: Theory of speckle dependence on surface roughness. *Journal Optical Society of America*, 66, (1210-), 1976.
- [30] Henri H. Arsenaul: Roughness determination with laser speckle. *Journal Optical Society of America*, 66, (1204-), 1976.
- [31] Hermmann J.M.: Physikalische Grenzen von optischen 3D-Sensoren. *Dissertation, Universität Erlangen, Nürnberg*, 1994.
- [32] Hertzsch A.: Verfahren zur Topographieanalyse mechanisch bearbeiteter Kristalloberflächen mit Hilfe von Streulichtmessungen. *Technische Universität Ilmenau, Dissertation*, 2000.
- [33] Hinsch K.D., Fricke-Begemann T., Göker G. and Wolff K.: Speckle correlation for the analysis of random processes at rough surfaces. *Optics and Lasers in Engineering*, 33, (87-105), 2000.
- [34] Horvath B., Hertzsch A.: Non-contact characterization of vertical regions of microstructures based on monochromatic speckle techniques. *Measurement Science and Technology*, 15, (923-932), 2004.
- [35] Horvath B.: Error model to determine the reliability of parametric measurements. *Digitale Bibliothek Thüringen, Dokument No4888*, 2005.
- [36] Horvath B.: Numerical simulation of multiple scattering for modeling speckle-roughness analyses on vertical surface regions of silicon wafers. *Optik: International Journal for Light and Electron Optics*, Volume 117, Issue 4, 2006.
- [37] Hu Y.Q.: Dependence of polychromatic-speckle-pattern contrast on imaging and illumination directions. *Applied Optics*, 33, (2707-), 1994.
- [38] Hüser D., Rinder T., Rothe H.: Vergleich der aus Topographiemessungen glatter Oberflächen berechneten Streulichtverteilungen mit den Streulichtmessungen in der Rayleigh-Rice-Näherung. *Vortrag B9, 100. Jahrestagung der DGaO, 25.05.-29.05. Berlin*, 1999.
- [39] John W. Y. Lit, Fujii H.: Surface roughness measurement using dichromatic speckle pattern: an experimental study. *Applied Optics*, 17, (2690-), 1978.
- [40] Koch W., Ruprecht M.W., Toedter O., Häusler G.: Optische Messtechnik an technischen Oberflächen. *Expert, Renningen-Malmsheim*, 1998.
- [41] Lebrasseur E., Pourciel J.B., Bourouina T., Masuzawa T., Fujita H.: A new characterization tool for vertical profile measurement of high-aspect-ratio microstructures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12, (280-285), 2002.
- [42] Leger D., Perrin J.C.: Real-time measurement of surface roughness by correlation of speckle patterns. *Journal Optical Society of America*, 66, (1217-), 1976.
- [43] Lehmann P.: In-process Laser-Messmethoden auf der Grundlage der Fourieranalyse. *Expert*, 2003.
- [44] Lehmann P.: Surface-roughness measurement based on the intensity correlation function of scattered light under speckle-pattern illumination. *Applied Optics*, 38, (1144-1152), 1999.
- [45] Lehmann P.: Untersuchungen zur Lichtstreuung an technischen Oberflächen im Hinblick auf eine prozessgekoppelte laseroptische Rauigkeitsmessung. *Dissertation Universität Brehmen, VDI-Verlag, Düsseldorf*, 1995.
- [46] Mathieu E., Leger D., Perrin J.C.: Optical surface roughness determination using speckle correlation technique. *Applied Optics*, 14, (872-77), 1975.
- [47] Mayinger F.: Optical measurements: techniques and applications. *Springer*, 2001.

- [48] Meyer M., Mildenerger O.: Signalverarbeitung : analoge und digitale Signale, Systeme und Filter. Vieweg, Braunschweig, 2000.
- [49] Nakagawa K., Yoshimura T., Minemoto T.: Surface-roughness measurement using Fourier transformation of doubly scattered speckle pattern. *Applied Optics*, 32, (4898-), 1993.
- [50] Nicodemus F. E., Richmond J. C., Hsia J. J.: Geometric considerations and nomenclature for reflectance, *U.S. Dept. of Commerce, NBS Monograph*, 1977.
- [51] Ogilvy J.A.: Theory of wave scattering from random rough surfaces. *Inst. of Physics Publ.*, Bristol, 1992.
- [52] Parry G.: Laser speckle and related topics. *Springer*, 2. Auflage, 1984.
- [53] Parry G.: Some effects of surface roughness on the appearance of speckle in polychromatic light. *Optics Communication*, 12, (75-78), 1974.
- [54] Patzelt S., Lehmann P., Schne A.: Surface roughness measurement by means of polychromatic speckle elongation. *Applied Optics*, 36, (2188-2197), 1997.
- [55] Pedersen H.M.: On the contrast of polichromatic speckle patterns and its dependence on surface roughness. *Optical Acta*, 22, (15-24), 1975.
- [56] Pedersen H.M.: The roughness dependence of partially developed, monochromatic speckle patterns. *Optics Communication*, 12, (156-59), 1974.
- [57] Persson U.: Real time measurement of surface roughness on ground surfaces using speckle-contrast technique. *Optics and Lasers in Engineering*, 17, (61-67), 1992.
- [58] Persson U.: Roughness measurement of machined surfaces by means of speckle technique in the visible and infrared regions. *Optical Engineering*, 32, (3327-32), 1993.
- [59] Porteus J.O., Bennett J.M.: Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence. *Journal Optical Society of America*, 51, (123-), 1981.
- [60] Rebollo M.A., Landau M.R., Hogert E.N., Gaggiolo N.G., Muramatsu M.: Roughness determination by direct visual observation of the speckle pattern. *Optics and Laser Technology*, 27, (355-56), 1995.
- [61] Ribbens W.B.: Interferometric surface roughness measurement. *Applied Optics*, 8, (2173-), 1969.
- [62] Robert A. Sprague: Surface roughness measurement using white light speckle. *Applied Optics*, 11, (2811-), 1972.
- [63] Robert B. Crane: Use of a laser-produced speckle pattern to determine surface roughness. *Journal Optical Society of America*, 60, (1658-), 1971.
- [64] Ruffing B.: Application of speckle-correlation methods to surface-roughness measurement: a theoretical study. *Journal Optical Society of America*, 3, (1297-), 1986.
- [65] Ruffing B.: Berührungslose Rauhgktsbestimmung technischer Oberflächen mit Speckle-Korrelationsverfahren. *Technische Universität Karlsruhe, Fak. für Maschinenbau, Dissertation*, 1987.
- [66] Ruprecht M.: Ferndiagnostik technischer Oberflächen mittels Laser-Speckle-Verfahren. *Shaker*, Aachen, 1998.
- [67] Sanchez-Gil J.A., Nieto-Vesperinas M., Moreno F., Gonzales F.: Speckle statistics of electromagnetic waves scattered from perfectly conduting random rough surfaces. *Journal Optical Society of America*, 10, (2628-36), 1993.
- [68] Schertler D.J., George N.: Roughness determination by speckle-wavelength decorrelation. *Optics Letters*, 18, (391-3), 1993.
- [69] Shiavi R.: Introduction to applied statistical signal analysis. *Academic Press*, San Diego, 1999.
- [70] Shindo Y., Fujii H., Asakura T.: Measurement of surface roughness properties by using image speckle contrast. *Journal Optical Society of America*, 67, (1171-), 1977.
- [71] Sirohi R.S.: Speckle metrology. *Dekker*, New York, 1993.
- [72] Sjudahl M.: Calculation of speckle displacement, decorrelation, and object-point location in imaging systems. *Applied Optics*, 34, (-7998), 1996.
- [73] Smith T.F., Suiter R.L., Kanayama K.: Bidirectional reflectance measurements for one-dimensional randomly rough surfaces. *Proc. 14th Thermophysics Conf. AIAA*, New York, 1979.

- [74] Sommargren G.E.: Heterodyne profilometer for measuring surface microstructure. *Journal Optical Society of America*, 69, (1404A-), 1979.
- [75] Stansberg C.T.: Surface roughness measurements by means of polychromatic speckle patterns. *Applied Optics*, 18, (4051-), 1979.
- [76] Stoffregen B.: Zur Statistik der Speckle-Erscheinungen. *Technische Universität Braunschweig, Dissertation*, 1979.
- [77] Stover J.C.: Optical scattering: measurement and analysis. *McGraw-Hill*, New York, 1990.
- [78] Stover J.C.: Roughness characterization of smooth machined surfaces by light scattering. *Applied Optics*, 14, (1796-), 1975.
- [79] Takai N.: Relation between statistical properties of surface roughness and the averaged speckle intensity in the diffraction field. *Optics Communications*, 14, (24-29), 1975.
- [80] Tay C.J., Toh S.L., Shang H.M., Zhang J.B.: Whole-field determination of surface roughness by speckle correlation. *Applied Optics*, 34, (2324-35), 1995.
- [81] Teague E.C., Vorbuerger T.V., Maystre D.: Light scattering from manufactured surfaces. *Annals of CIRP*, 30, (568-), 1981.
- [82] Toh S.L., Quan C., Woo K.C., Tay C.J., Shang H.M.: Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique. *Optics and Laser Technology*, 33, (427-434), 2001.
- [83] Vashisht S.K., Radhakrishnan V.: Gloss meter for surface evaluation. *Journal Inst. Eng.*, 55, (144-150), 1974.
- [84] Vorbuerger T.V., Teague E.C.: Optical techniques for on-line measurement of surface topography. *Precision Engineering*, 3, (61-83), 1993.
- [85] Wong P.L., Li K.Y.: In-process roughness measurement on moving surfaces. *Optics and Laser Technology*, 31, (543-548), 1999.
- [86] Xuecheng B., Yatseng C., Huahan L., Wenyi M., Songlin Z.: Determination of surface roughness by contrast of laser speckle in real time. *SPIE*, 814, (113-5), 1987.
- [87] Yoshimura T., Kato K., Nakagawa K.: Surface-roughness dependence of the intensity correlation function under speckle-pattern illumination. *Journal Optical Society of America*, 7, (2254-), 1990.
- [88] Zanetta P., Facchini M.: Local correlation of laser speckle applied to the study of salt efflorescence on stone surfaces. *Optics Communication*, 104, (35-8), 1993.
- [89] Zavada J.M., Church E.L., Jenkinson H.A.: Relation between surface scattering and micro-topographic features. *Optical Engineering*, 18, (125-), 1979.

Thesen

1. Die Rauigkeit der reflektierenden Oberfläche lässt sich auch aus einer außerhalb der spekularen Streurichtung erfassten Speckle-Intensitätsstruktur ableiten. Dadurch kann insbesondere die objektive Speckle-Erscheinung zur Rauigkeitsanalyse solcher schwer zugänglichen Oberflächen eingesetzt werden, wobei die spekulare Reflexion nicht detektierbar ist.
2. Werden senkrechte Oberflächenbereiche von Mikroreplikationswerkzeugen oder Mikrostrukturen mit einem konvergenten Laserbündel unter entsprechendem Einfallswinkel belichtet und mindestens ein Ausschnitt der diffus gestreuten objektiven Specklestruktur detektierbar ist, so lässt sich die Rauigkeit dieser Oberflächenbereichen durch Auswertung der Specklestrukturen bewerten.
3. Specklemuster werden durch von dem einfallenden Strahldurchmesser abhängige Ortsfrequenzen gekennzeichnet. Somit lassen sich die an umliegenden Oberflächen gestreuten sekundären Störungen mit Hilfe eines angepassten räumlichen Bandpass-Filters beseitigen. Die Ausfilterung von Störintensitäten erhöht die Zuverlässigkeit der Vermessung.
4. Mit dem beschriebenen Aufbau und Messstrategie kann eine Rauigkeitsanalyse für Mikrostruktur-Seitenwänden in einem Bereich von $0 \mu\text{m} < R_q < 0.5 \mu\text{m}$ und mit einer Genauigkeit von $\pm 8-10 \text{ nm}$ erzielt werden.
5. Zur Beschreibung der Rauigkeit kann eine Ortskorrelation verwendet werden, wobei der Korrelationskoeffizient mittels geringfügiger Verschiebung der zu vermessenden Probe errechnet wird. Vorteil dabei ist, dass der Messbereich und die Messgenauigkeit durch den Betrag der Verschiebung in einem breiten Bereich einzustellen sind ($0 \mu\text{m} < R_q < 5 \mu\text{m}$).
6. Das Zuverlässigkeitsintervall einer parametrischen Vermessung kann präziser ermittelt werden, falls der zu gegebener Signifikanz gehörige Konfidenzradius um den Genauwert herum berechnet wird (statt des Erwartungswertes). Deren Bestimmung ist unter Berücksichtigung der systematischen und statistischen Fehler mit Iteration möglich.
7. Auf Basis der Kirchhoffschen skalaren Beugungstheorie kann ein Simulationsmodell sowohl für Speckle-Kontrast- als auch für Speckle-Korrelationsmethoden aufgestellt werden. Der Algorithmus ermöglicht die Modellierung auch von Mehrfachstreuungen bei vertikalen Mikrostrukturbereichen. Durch die Simulation besteht die Möglichkeit, praktisch nicht ermittelbare Effekte (z.B. Einfluss der Korrelationslänge) und die Realisierbarkeit von Speckle-Messverfahren für beliebige optischen Anordnungen, Beleuchtungen und Materialeigenschaften zu untersuchen.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalte der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch angesehen wird und den erfolglosen Abbruch des Promotionsverfahrens zu Folge hat.

Ilmenau, den 06. Juni 2006

M.Sc. Balazs Horvath

Lebenslauf



Personalien

Name: Balazs Horvath
Geburtsdatum: 01.07.1976
Geburtsort: Budapest / Ungarn

Qualifizierungsangaben

1990 - 1994 Kolos Richard Technische Mittelschule
Abitur / mechatronischer Techniker
1994 - 2000 Technische Universität Budapest, Fakultät für Maschinenbau
Fachrichtung Mechatronik
2003 - 2006 Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau
Promotionsstudium am Fachgebiet Mikrosystemtechnik

Berufstätigkeiten

01.2000 - 05.2000 Coloryte Hungary AG, Konstruktion eines Auflösungsmessgeräts für
augenmedizinische Untersuchungen (Diplomarbeit)
06.2000 - 08.2000 Coloryte Hungary AG, Entwicklung eines Prüfgeräts zur
Lebensdaueruntersuchung von Lichtquellen
09.2000 - 11.2000 Biberzahn GmbH, dreimonatliches Praktikum, optische Vermessungen
an Schneidgeometrien neuartiger Sägezähne
01.2001 - 12.2002 Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Mikrosystemtechnik,
Projektarbeit zum Thema „Strukturierung von Mikroformeinsätzen für
Replikationsverfahren“
01.2003 - Innovent Technologieentwicklung e.V., Entwicklung optischer
Sensoren für industrielle Anwendungen